

Arthroskopie 2021 · 34:366–376

<https://doi.org/10.1007/s00142-021-00468-5>

Angenommen: 19. April 2021

Online publiziert: 14. Juni 2021

© Der/die Autor(en) 2021, korrigierte

Publikation 2022

Redaktion

M. Hirschmann, Liestal/Schweiz

J. Agneskirchner, Hannover



Zusatzmaterial online

Zusätzliche Informationen in Form von DICOM-Material und einem Video sind in der Online-Version dieses Artikels (<https://doi.org/10.1007/s00142-021-00468-5>) enthalten.

Ausgeprägte glenoidale Defektsituationen stellen einen hohen Anspruch an die operative Versorgung. Die Genese ist ätiologisch vielfältig, sie reicht von anlagebedingten, degenerativen, rheumatischen, traumatischen, infektiösen Ursachen bis zum Versagen bereits einliegender Implantate [7, 8, 19]. Die Untergruppe der fehlgeschlagenen (anatomischen und inversen) Schulterendoprothesen nimmt dabei eine besondere Stellung ein, da bei weltweit zunehmenden Implantationen von Schulterendoprothesen und dem Umstand, dass das glenoidale Versagen eine der Hauptursachen für Reinterventionen darstellt, ein steigender Bedarf an suffizienten Versorgungsstrategien anzunehmen ist [2, 26, 29, 32, 42, 44–46].

Herkömmliche Strategien, wie exzentrisches Fräsen, Verzicht auf ein glenoidales Implantat mit lediglich Durchführung einer Hemiarthroplastik und konfektionierte augmentierte Implantate stoßen mit zunehmender Komplexität des Glenoiddefekts dabei an ihre Grenzen bzw. sind mit schlechteren Ergebnissen vergesellschaftet [16, 22, 24, 25, 27, 33, 37]. Der Aufbau komplexer Glenoiddefekte durch Knochentransplantate birgt das Risiko von Graftresorption und Implantatversagen, so dass unter Umständen ein zweizeitiges Vorgehen bei mangelnder gleichzeitiger Verankerungsmöglichkeit

M. Petermann¹ · J. Agneskirchner²

¹ Orthopädisch-Traumatologisches-Zentrum, HELIOS Park-Klinikum Leipzig, Leipzig, Deutschland

² Gelenkchirurgie Orthopädie Hannover go:H, Hannover, Deutschland

Patientenindividuelle glenoidale Implantate in der Schulterendoprothetik

der Endoprothese notwendig wird [7, 13, 15, 19, 20, 21, 34, 36]. Das glenoidale Bone-Grafting ist außerdem mit erheblichen intraoperativen und technischen Anforderungen an den Operateur mit diversen Fehlermöglichkeiten verbunden.

Patientenindividuelle glenoidale Implantate stellen demgegenüber ein modernes Verfahren dar, welches potenziell erhebliche Vorteile in der Behandlung glenoidaler Knochendefektsituationen bietet.

Mit der aktuell vorhandenen Literatur ist es sowohl auf Grund der Neuheit als auch der limitierten Verfügbarkeit patientenindividueller Implantate am Glenoid kaum möglich, eine wissenschaftlich fundierte Evidenz der Vorteile im

Vergleich zu herkömmlichen Techniken (Spanaufbauten, konfektionierte metallische Implantate) aufzuzeigen. Ziel dieser Arbeit ist es, das enorme Potenzial dieser Technologie anhand seiner Prinzipien und durch Fallbeispiele darzustellen.

Indikationsstellung

Die Indikation für patientenindividuelle glenoidale Implantate stellen ausgeprägte Knochendefekte dar, welche mit konventionellen Verfahren (Standard-/Revisionsimplantate und/oder Knochenaufbau) im Hinblick auf eine stabile Verankerung und/oder auf das Erzielen der gewünschten Implantatpositionierung nicht adäquat adressierbar sind.

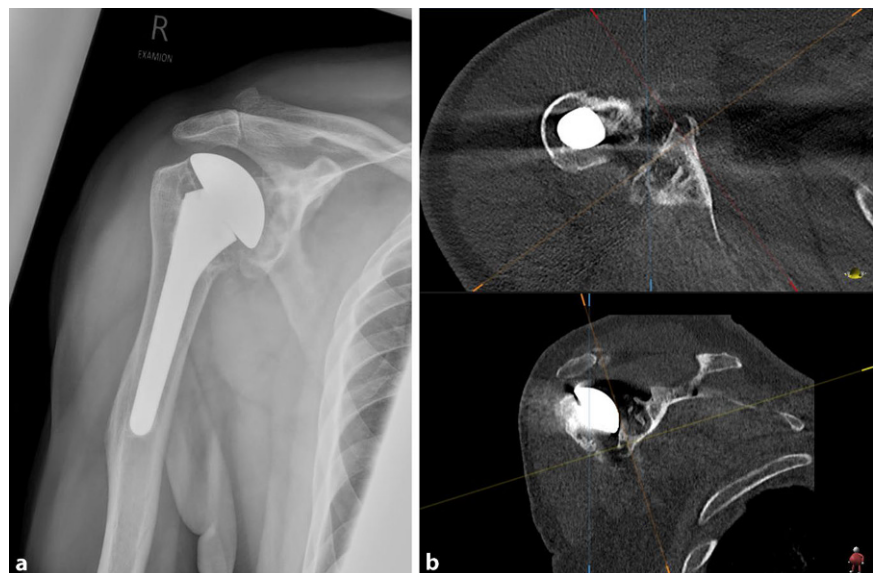


Abb. 1 ▲ **a** Patient 1: Röntgenaufnahme eines 71-jährigen Patienten, 20 Jahre nach Implantation einer anatomischen Schulterendoprothese mit gelockerter Polyethylenpfanne und zum großen Teil osteolytischer Destruktion des Glenoids. **b** Axiale und koronale Rekonstruktionen in der Computertomographie (CT) zeigen das genaue Ausmaß der Osteolysen

Tab. 1 Computertomographie-Protokoll ProMade für Schulter (LimaCorporate, San Daniele, Italien)

Lagerung	Rückenlagerung Zu untersuchender Arm neben dem Körper Kontralateraler Arm über dem Kopf
Zu scannender Bereich	Von kranial des Akromions bis 15 cm kaudal der Skapula bzw. 3 cm unter einem einliegenden Implantat oder kritischen Knochendefekten
Schichtdicke	Optimal: 1,0 mm Maximal: 2,0 mm
Inkrement	Optimal: 0,6 mm Maximal: 2,0 mm
FOV („field of view“)	25–30 cm
Matrix	512 × 512 empfohlen
Algorithmus	Standard oder Weichteil, keine Kantenanhebung
Metallartefaktreduktion	Im Detail den Herstellervorgaben zu entnehmen (Röhrenspannung, ggf. Dual-Energy)
Datenformat	DICOM

Aufgrund der Möglichkeiten des „additive manufacturing“ (3-D-Druck-Verfahren) ist diese Technologie potenziell in der Lage, durch eine individuell angepasste und optimierte Gestaltung des Implantatdesigns dem zwingenden Anspruch einer primär stabilen knöchernen Verankerung gerecht zu werden. Gleichzeitig besteht das Potenzial, die präoperativ geplante Positionierung der Glenoidkomponente präzise operativ umzusetzen und trotz Defektsituation in Hinblick auf Inklination, Version und Restoration der Gelenklinie eine korrekte Implantatlage zu erreichen. Glenoidale Fehlpositionierungen sind mit verminderter Beweglichkeit, verstärktem inferioren Notching, einem erhöhten Instabilitäts- und Komplikationsrisiko bzw. einem Risiko für glenoidale Lockerung assoziiert [5, 10, 11, 15, 17, 23, 28, 39].

Im Gegensatz dazu sind Knochenaufbauplastiken als wesentliches Alternativverfahren zur Behandlung ausgeprägter Glenoiddefekte neben einer gesteigerten operativen Schwierigkeit mit einer potenziell schlechteren Präzision der Implantatpositionierung, Entnahmemorbidität bei autologem Graft und unter Umständen einer mangelnden Primärstabilität, welche ein zweizeitiges Vorgehen notwendig macht, assoziiert.

Wenngleich grundsätzlich die Möglichkeit existiert, patientenspezifische glenoidale Implantate mit einer anatomischen Endoprothese zu verwenden [9, 38], so besteht auf Grund eines anzunehmenden gestörten Weichteil-

balancings bzw. einer unzureichenden Rotatorenmanschettenfunktionalität bei ausgeprägten glenoidalen Defektsituationen die Notwendigkeit einer inversen Versorgung. Auch anhand der Literatur ist im Hinblick auf die Langlebigkeit des Implantats und die Stabilität der Endoprothese bei vorhandenen glenoidalen Knochendefekten eine inverse Endoprothese zu favorisieren [22, 37, 41].

Obwohl verschiedene Klassifikationssysteme für Glenoiddefekte existieren, sind aktuell daraus weder Handlungsempfehlungen noch prognostische Schlüsse für die Verwendung patientenindividueller Implantate abzuleiten [1, 3, 12, 14, 19, 35, 40, 43].

Im eigenen Vorgehen werden patientenspezifische glenoidale Implantate daher immer dann in Betracht gezogen, wenn neben den radiologischen Voraussetzungen eines Glenoiddefekts die beiden o. g. Faktoren (unsichere Primärstabilität und/oder mangelnde Reproduzierbarkeit einer adäquaten Positionierung in Verbindung mit alternativen Verfahren) fraglich sind.

Kontraindikationen

Bezüglich der Kontraindikationen gelten grundsätzlich die für die Schulterendoprothetik allgemeinen Prinzipien. Andere Aspekte, wie beispielsweise die Einschätzung des Aufwand-Nutzen-Risiko-Verhältnisses (z. B. Incompliance der Patienten, Palliativsituationen) sollten in-

dividuell, an die Situation der Patienten angepasst, betrachtet werden.

Grundsätzlich ist in Bezug auf das Verwenden patientenspezifischer Implantate eine individuelle Entscheidung unter Berücksichtigung der vorhandenen Pathologie und aller Begleitumstände zu empfehlen.

Präoperatives Management

Der gesamte Prozess der Planung und Anfertigung eines patientenindividuellen Implantats basiert zunächst auf der Durchführung einer nativen Computertomographie (CT) der betreffenden Schulter (Abb. 1). Einstellungsparameter und qualitative Mindestanforderungen dafür sind den jeweiligen Anbietern zu entnehmen und exemplarisch in Tab. 1 zusammengefasst. Hervorzuheben ist, dass grundsätzlich eine geringe Schichtdicke – im eigenen Vorgehen stets unter 1 mm – zu empfehlen ist. Nach Segmentierung der CT-Daten wird computergestützt ein Implantatdesign errechnet, welches der vorhandenen knöchernen Oberfläche bzw. dem verbliebenen Knochen angepasst ist (Abb. 2). Ungenauigkeiten oder Ungewissheiten der Knochenstruktur stellen diesbezüglich einen Risikofaktor dar, welcher schlimmstenfalls zur mangelnden Passgenauigkeit des Implantats führen kann. Beispielhaft sei hier weniger röntgendichter Kallus bei Frakturheilung oder eine fragliche Anheilung bzw. Resorption eines knöchernen Grafts genannt.

Bezüglich des Vorhandenseins von Fremdmaterialien im Schultergelenk ist zum einen die Anfälligkeit für CT-Artefakte, zum anderen die Explantierbarkeit zu hinterfragen. Große metallische und artefaktreiche Implantate im Glenoid sollten vor dem CT-Scan entfernt werden [8]. Vollständig gelockerte Polyethylen(PE)-Glenoide einer einliegenden Schulterendoprothese konnten im eigenen Vorgehen regelhaft belassen werden, da sie keine größeren Artefakte verursachen, welche eine sichere Planung verhindern würden, so dass nach hinreichend sicherem Infektausschluss einzeitige Wechseloperationen möglich sind (Abb. 3). Es sei jedoch darauf

hingewiesen, dass die Explantation eines subtotal gelockerten glenoidalen Implantats ggf. iatrogene Veränderungen der Knochenstruktur zur Folge haben kann, mit ihrerseits Auswirkungen auf die Implantation der patientenspezifischen Komponente. Humeralseitig, v. a. bei metallischen Komponenten, werden ebenfalls CT-Artefakte verursacht, welche eine potenzielle Fehlerquelle für Ungenauigkeiten des Implantatdesigns darstellen. Wenngleich sie in der eigenen Praxis bisher stets belassen werden konnten und eine hinreichend sichere Beurteilbarkeit des Glenoids zugelassen haben, so ist im Zweifelsfall zunächst die Explantation artefaktverursachender Materialien vor Durchführung der Planungs-CT zu empfehlen. Gegebenenfalls kann durch Lagerungsmaßnahmen bei der CT die Artefaktbelastung zusätzlich reduziert werden [8].

Es gilt weiterhin zu bedenken, dass prozessbedingt zwischen der Schnittbildgebung, welche zur Planung des individuellen Implantats notwendig ist, und der eigentlichen Operation ein zeitlicher Abstand besteht. Jegliche Form des knöchernen Um-/Abbaus ist potenziell dazu in der Lage, die Passgenauigkeit des maßgefertigten Implantats herabzusetzen. Das Glenoid penetrierende, abradierende Ursachen und osteolytische Prozesse (z. B. Implantatlockerung) sollten daher auch im Hinblick auf die Passgenauigkeit zeitlich möglichst kurzgehalten werden. Gleiches gilt grundsätzlich auch für Situationen ohne einliegende Fremdkörper mit potenziell verstärktem knöchernen Remodeling, z. B. bei inflammatorischen Prozessen im Rahmen von Autoimmunerkrankungen.

» Der zeitliche Abstand zwischen CT und Operation sollte so gering wie möglich gehalten werden

Die Abwägung der primär durchzuführenden Maßnahmen muss daher unter Beachtung der vorliegenden Pathologie sowie unter Berücksichtigung der anzunehmenden CT-Operations-Zeit stets individuell erfolgen.

Arthroskopie 2021 · 34:366–376 <https://doi.org/10.1007/s00142-021-00468-5>
© Der/die Autor(en) 2021

M. Petermann · J. Agneskirchner

Patientenindividuelle glenoidale Implantate in der Schulterendoprothetik

Zusammenfassung

Die Behandlung ausgeprägter glenoidaler Knochendefekte ist herausfordernd. Patientenindividuelle glenoidale Implantate stellen diesbezüglich ein neues Verfahren dar, welches mit enormen potenziellen Vorteilen behaftet ist. Die eigenen Erfahrungen zeigen, dass mit dieser Technologie einerseits der glenoidale Knochendefekt reproduzierbar wiederherzustellen ist und andererseits eine stabile Verankerung und eine hochpräzise Implantatpositionierung entsprechend der präoperativen Planung erzielt werden kann. Dies stellt sich besonders im Vergleich zu Alternativverfahren, wie der knöchernen Glenoidaugmentation, als substanzieller Vorteil der Technik für diese häufig hochdefizitären und anspruchsvollen Situationen dar. Nach Durchführung einer Computertomographie (CT) der Schulter wird präoperativ das individuelle Implantatdesign dreidimensional detailliert computergestützt

geplant. Von zentraler Bedeutung für die korrekte und planungsgetreue Positionierung des definitiven Implantats während der Operation ist eine präzise Einbringung eines Kirschner-Drahts mittels PSI („patient specific instrumentation“-)Guide. Nach Fixation der glenoidalen Komponente kann diese mit Standardimplantaten des jeweiligen Systems kombiniert werden. Die aktuell vorhandene Literatur ist ermutigend und zeigt, dass kurzfristig signifikante klinische Erfolge mit dem Verfahren erzielbar sind. Weitere Forschung im Sinne von biomechanischen Untersuchungen und längerer Nachuntersuchungszeiträumen ist wünschenswert, um die Wertigkeit des Verfahrens weiter zu präzisieren.

Schlüsselwörter

Schulter · CAM/CAD · 3-D-Druck · Patientenspezifisch · Glenoiddefekt

Custom-made glenoid implants in shoulder arthroplasty

Abstract

The treatment of severe glenoid bone defects is challenging. In this respect custom-made glenoid implants represent a fascinating new method with enormous potential advantages. Own experiences show that with this technology even large glenoid bone defects can be reproducibly reconstructed and a stable fixation as well as a highly precise implant placement according to the preoperative plan can be achieved. This represents a substantial benefit of the procedure for these frequently highly deficient and demanding situations, especially compared to alternative treatment options, such as bony glenoid augmentation. After performing computer tomography of the shoulder, preoperatively the patient individual implant design is planned 3-dimensionally in detail with the aid of a computer. Of central

importance for the correct and planning-conform positioning of the definitive implant during surgery is the accurate PSI (patient specific instrumentation)-guided insertion of a Kirschner wire. After fixation of the glenoid component it can be combined with standard implants of the respective system. The existing literature is encouraging and shows that significant short-term clinical success is achievable with this procedure. Further research by means of biomechanical investigations and longer follow-up periods is necessary to further specify the value of this procedure.

Keywords

Shoulder · CAM/CAD · 3D printing · Patient-specific · Glenoid defect

Planung

Eine intensive und detaillierte präoperative Planung, im Englischen als „surgery before the surgery“ bezeichnet, nimmt in der Behandlung ausgeprägter Glenoiddefekte mit patientenindividuellen Implantaten eine besondere Stellung mit immen-

sem Wert ein. Die präoperativ durchgeführte Planungs-CT bietet die Grundlage dafür. Informationen über die vorhandene Pathologie bzw. die Begleitumstände der Patienten und, soweit vorhanden, grobe Designvorstellungen des Operateurs helfen zunächst dabei, zusammen mit einem Planungsingenieur

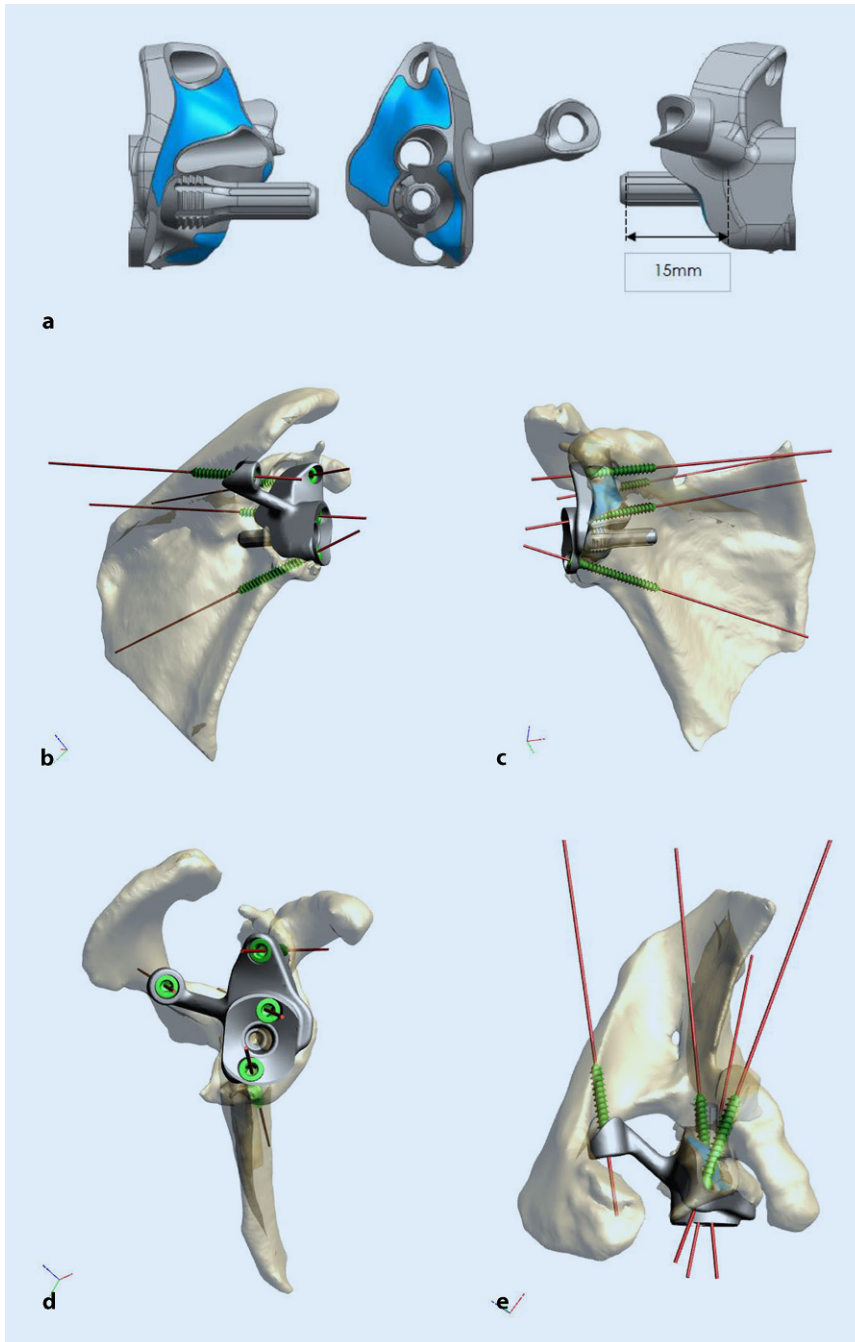


Abb. 2 ▲ **a** Design des für Patient 1 geplanten custom-made Implantats. Die blaue Fläche repräsentiert eine trabekuläre Oberfläche (Titan) und trägt maßgeblich zur knöchernen Einheilung bei. Neben einer möglichst großen Dimensionierung dieser Fläche ist eine zusätzliche Erhöhung der Stabilität durch eine Fixierung an der Spina scapulae geplant. **b–e** Dreidimensionale Darstellung der virtuell implantierten glenoidalen Komponente aus verschiedenen Perspektiven. Im Rahmen der computergestützten Planung ist eine Visualisierung der Verhältnisse aus jeglichen Blickwinkeln möglich. (LimaCorporate, San Daniele, Italien)

des Herstellers einen vorläufigen Designvorschlag computergestützt zu generieren (Abb. 4). Eine im Rahmen einer Fallanalyse umfassende Darstellung aller relevanten Aspekte der Operation generieren einen Informationsgewinn für den

Operateur bzw. bilden die Grundlage für Optimierungspotenzial und weiterführende Überlegungen. Folgende Punkte sollten präoperativ thematisiert werden:

- strukturelle Ausgangssituation,

- Knochenqualität und Qualität der CT-Daten,
- Designüberlegungen zur Sicherstellung einer hinreichenden Festigkeit,
- Positionierung des Implantats, ggf. zusätzliche operative Schritte (Fräsen etc.),
- mögliches Bewegungsausmaß in Abhängigkeit unterschiedlich großer Gleitpartner (Glenosphäre/Inlay),
- Spannungsverhältnisse und Kraftvektoren nach Reposition der humeralen Komponente,
- Anzahl, Länge, Dicke und Positionierung von Schrauben,
- Design verschiedener, ebenfalls patientenindividueller PSI-Guides (Abb. 5 und 6).

Die Technologie der patientenindividuellen Implantate erlaubt grundsätzlich eine immense Vielfalt an Möglichkeiten der Implantatkonfiguration. Neben einer zumeist fest eingepplanten Fixierung an der Korakoidbasis sind Verankerungen an der Spina scapulae, Modifikationen eines zentralen Zapfens in Dicke, Länge und Position sowie das Vorhandensein eines Flansches verschiedene Optionen, um die Primärstabilität zu erhöhen. Diverse PSI-Guides vereinfachen die Präparation und bilden die Grundlage für eine planungsgemäße Implantation der glenoidalen Komponente. Auch hier ist grundsätzlich eine große Variabilität im Design möglich.

» Die exakte Positionierung des zentralen Kirschner-Drahts ist ein wesentlicher Schritt der Operation

Von wesentlicher Bedeutung bei der Operation ist, dass ein zentraler Kirschner-Draht exakt positioniert wird, da die weiteren wesentlichen Operationschritte und schlussendlich auch die Passgenauigkeit des definitiven Implantats hiervon abhängen. Dieser K-Draht muss zwingend mittels individueller Schablone eingebracht werden. Bereits bei der Planung ist daher darauf zu achten, dass dieser PSI-Guide verlässlich platziert werden kann. Neben den zu pla-

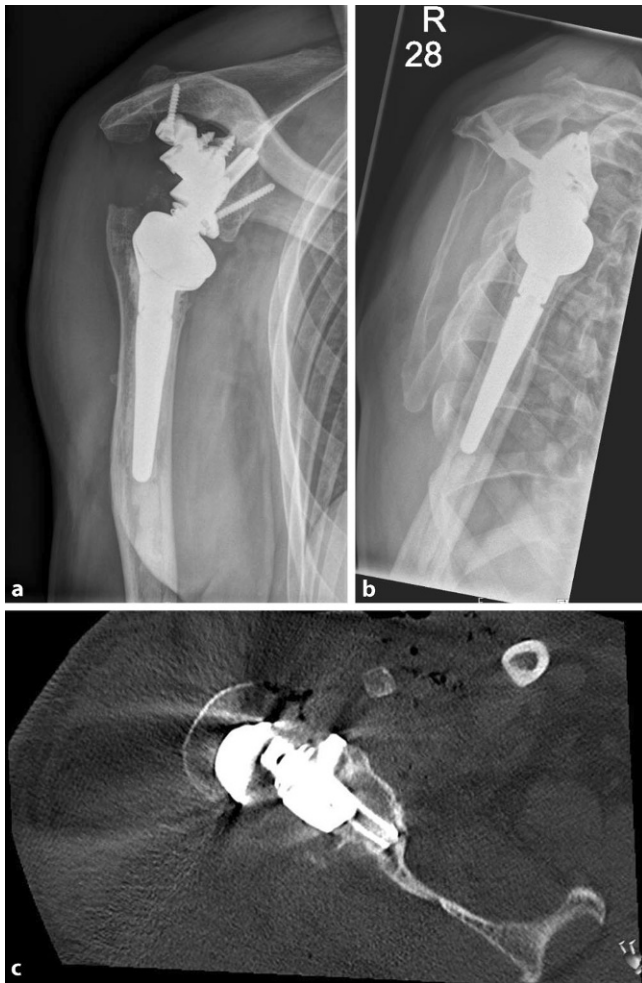


Abb. 3 ◀ a, b Postoperative Röntgenkontrolle (Patient 1) mit exakter Umsetzung der präoperativen Planung. Es erfolgte ein einzelziger Wechsel bei hinreichender präoperativer Computertomographie(CT)-Qualität (Abb. 1) und CT-Operationszeit von ca. 2,5 Monaten. c Dezierte Analyse der Positionierung mittels postoperativer CT-Kontrolle in axialer Rekonstruktion. Zentraler Zapfen liegt intraossär. Gutes Resultat im Hinblick auf Version und Rekonstruktion der Gelenklinie

nenden Auflagepunkten (am gesunden oder alterierten Knochen) ist zu bedenken, dass tendenziell ein ausladendes, „bulky“ Design v.a. bei verbliebenem Humeruskopf die korrekte Platzierung des PSI-Guides erschwert.

Auch die weiteren Präparationsschritte werden durch individuelle Schablonen unterstützt. Beispielsweise ist die Frästiefe für den zentralen Zapfen damit einstellbar, so dass dieser nach definierter Perforation der medialen Kortikalis hier eine zusätzliche Stabilität bieten kann. Das Vorbohren der Schrauben kann ebenfalls mit der präoperativ festgelegten Angulierung erfolgen, damit sie in der sich nach medial verjüngenden Skapula sicher intraossär zu liegen kommen (Abb. 7).

Im Rahmen der präoperativen Planung können schließlich weitere relevante Aspekte computergestützt visualisiert werden. Beispielsweise besteht bei großer metallischer Lateralisierung

die Gefahr, dass es zu einem inferioren Hardware-auf-Hardware-Notching kommt, welches nach Ansicht der Autoren vermieden werden sollte (Abb. 8).

Soweit kein Modifikationsbedarf (mehr) besteht und der Operateur mit allen Aspekten der Implantat- und Operationsplanung einverstanden ist, sollte die Produktion in Auftrag gegeben werden. Planungsprozess und Produktion tragen wesentlich zum zeitlichen Abstand zwischen CT und Operation bei, so dass hier möglichst keine unnötigen Verzögerungen entstehen sollten.

Durchführung der Operation

Wie bei letztlich jeder Implantation einer Endoprothese ist ein adäquater Zugang zum Glenoid zu gewährleisten. Der deltoideopektorale Zugang ist für dieses Verfahren zwingend zu empfehlen. Nach sorgfältiger Weichteilpräparation unter

Darstellung und Schonung des N. axillaris ist das Glenoid großzügig freizulegen. Individuell angefertigte sterile 3-D-Skapulamodelle, anhand derer man sich die Verhältnisse veranschaulichen und direkt immer wieder mit dem realen Situs vergleichen kann, sind dabei v.a. bei hochgradig alterierten Situationen hilfreich (Abb. 9). Das Glenoid muss behutsam von Weichteilen befreit werden, ohne dass der Knochen an sich entfernt wird. Entsprechend des PSI-Guide-Designs müssen alle Kontaktpunkte zwischen Schablone und Knochen freiliegen bzw. die Weichteile so mobilisiert werden, dass ein satter und kippelfreier Sitz auf dem Knochen möglich ist. Wie bereits erwähnt, gilt es stets zu bedenken, dass die Positionierung des Kirschner-Drahts sowohl die weitere Bearbeitung als auch schlussendlich wesentlich die Lage des definitiven Implantats bestimmt. Sollte dieser K-Draht nicht zufriedenstellend platziert sein, so besteht die zwingende Notwendigkeit, ihn in neuer und verbesserter Lage zu positionieren. Weitere individuelle Schablonen dienen der zusätzlichen Überprüfung der korrekten Bearbeitung und der zu erwartenden Implantatpositionierung vor dem Einbringen des metallischen Materials (Abb. 9).

Nach Implantation des definitiven glenoidalen Implantats ergeben sich die weiteren Operationsschritte entsprechend der spezifischen Verhältnisse und der Präferenzen des Operateurs. Soweit die patientenindividuelle Glenoidkomponente in einem Plattformsystem eingebettet und kompatibel ist, stehen alle anderen Implantatkonstellationen prinzipiell uneingeschränkt zur Verfügung (Abb. 10).

Vorteile

Auf Basis der Erfahrungen der Autoren zeigt dieses Verfahren folgende Vorteile:

- Eine primär suffiziente Verankerung der Glenoidkomponenten kann erreicht werden. Durch die dem „additive manufacturing“ innewohnende große Designvariabilität kann die vorhandene Knochensubstanz bestmöglich adressiert und somit die glenoidale Stabilität erhöht werden.

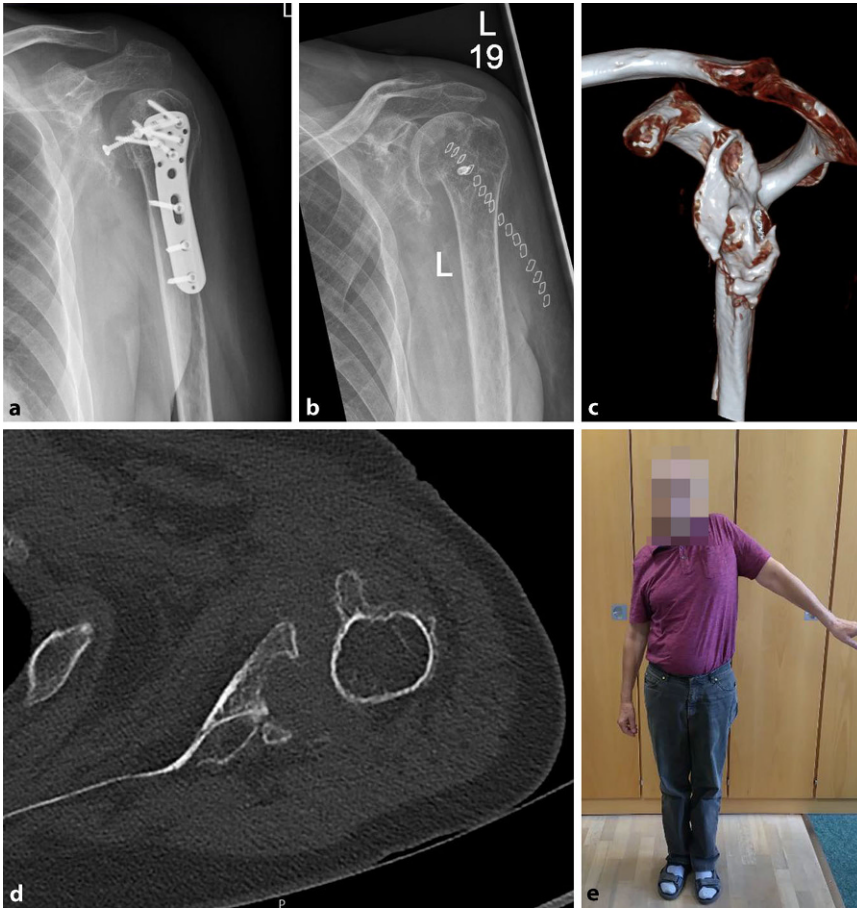


Abb. 4 ▲ **a** Patient 2: Röntgenbild eines 60-jährigen Patienten, 1 Jahr nach Plattenosteosynthese einer Humeruskopffraktur. Penetration des Osteosynthesematerials ins Glenoid. **b** Röntgenbild nach umgehender Materialentfernung. Hier klare Entscheidung zum zweizeitigen Vorgehen, da die aggressive fortschreitende Zerstörung des Glenoids durch das Metall bis zur Operation die Passgenauigkeit des Implantats herabsetzen kann. **c, d** Die Computertomographie (3-D-Rekonstruktion, axiale Rekonstruktion) zeigt das Ausmaß des Knochendefekts, betrifft bis auf einen kleinen Bereich ventral den größten Teil der Gelenkfläche, von dorsal nach medial reichend. DICOM-Daten sind im Supplementary Material hinterlegt. **e** Klinischer Befund (Abduktion) präoperativ

- Ausgangssituationen, welche bisher ein zweizeitiges Vorgehen mit knöchernem Glenoidaufbau erforderlich machten, können durch Anfertigung eines patientenindividuellen Implantats einzeitig versorgt werden. Damit sind zusätzliche und belastende Operationen vermeidbar.
- Das Verfahren bietet die Möglichkeit, die präoperativ geplante Implantatpositionierung, v. a. in Anbetracht der oft anspruchsvollen Ausgangssituation, mit hoher Präzision operativ umzusetzen.
- Es entsteht keine Entnahmemorbidität von autologen Knochen-spanplastiken. Graft-Resorptionen mit sekundärer Instabilität werden vermieden.

- Die Operationszeit (und damit potenziell das Infektionsrisiko) ist gegenüber anspruchsvollen Glenoidrekonstruktionen vermindert.
- Die präoperative Planung bzw. Diskussion mit dem Planungsingenieur („surgery before the surgery“) ermöglicht es, viele relevante Aspekte bereits präoperativ zu erfassen, zu visualisieren und erleichtert damit die Operation an sich.
- Soweit patientenindividuelle Implantate in Plattformsysteme eingebettet sind, stehen neben der glenoidalen knöchernen Fixierung alle sonst vorhandenen Optionen der Endoprothesenversorgung zur Verfügung.

Nachteile

Mit dem Begriff „Nachteile“ sind hier im Wesentlichen potenziell mögliche Nachteile gemeint, welche bisher auf Grund der Neuheit des Verfahrens noch nicht in größerem Umfang nachuntersucht sind:

- Die Studienlage ist aktuell noch rar. Weder existieren profunde längerfristige klinische und radiologische Ergebnisse, noch kann mittels prospektiver vergleichender Studien eine Überlegenheit des Verfahrens attestiert werden.
- Die Kraftübertragung zwischen Implantat und Knochen ist gegenüber einer Standardversorgung unter Umständen stark verändert. Die langfristigen Auswirkungen sind bisher nicht hinreichend erforscht. Eine höhergradige metallische Lateralisierung ist mit potenziellen Risiken behaftet [47].
- Im Revisionsfall (z. B. Infektion) ist ggf. auf Grund der hohen Stabilität in Verbindung mit einer weit medialen Knochen-Implantat-Grenze die Revidierbarkeit deutlich erschwert.
- Monetäre Aspekte patientenindividueller Implantate stellen unter Umständen in der Breite gewisse Barrieren dar. Im Zuge der Gewinnung von Evidenz kann sich eine Argumentationsgrundlage für die Readjustierung der Vergütung bilden.

Literaturüberblick

Jüngst publizierte Studien, welche allesamt die Behandlung fortgeschrittener glenoidaler Defektsituationen mit patientenindividuellen Implantaten in Kombination mit einer inversen Endoprothese untersuchen, attestieren übereinstimmend, dass mit diesem Verfahren für einen kurzfristigen Nachuntersuchungszeitraum signifikante klinische Verbesserungen erreicht werden können [4, 8, 30, 31]. Die Komplikationsrate ist dabei niedrig bzw. entspricht dem größtenteils operativ anspruchsvollen Patientengut im Rahmen von Revisionseingriffen. Komplikationen, welche direkt mit den glenoidalen Implantaten assoziiert waren, wurden nicht berichtet. Ebenso

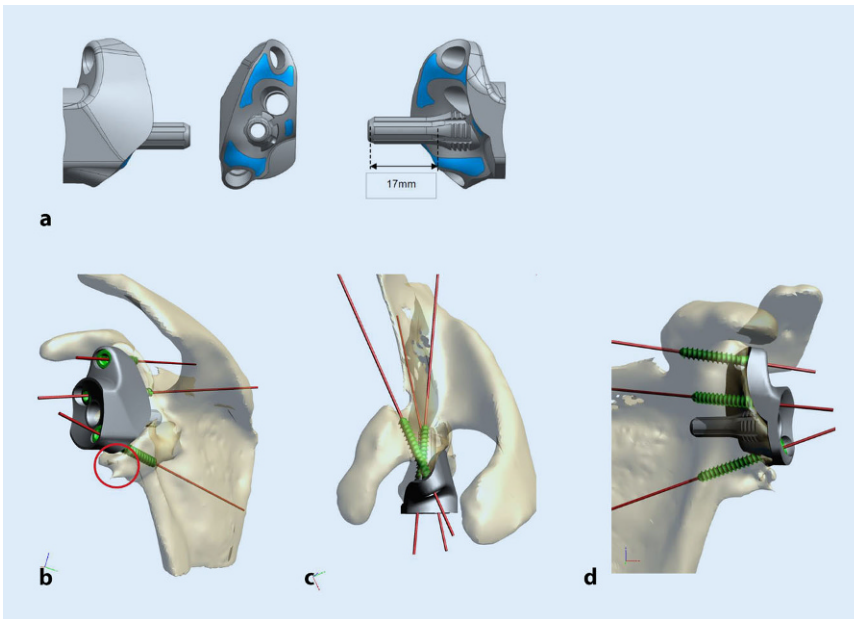


Abb. 5 ▲ **a** Design eines patientenindividuellen Implantats mit metallischer Augmentation des dorsalen Glenoiddefekts (Patient 2). **b–d** 3-D-Darstellung mit Blick von dorsolateral, kranial und ventral auf Implantat und Skapula. Der rote Kreis zeigt reaktive Knochenanbauten, welche die inferiore Beweglichkeit behindern. Die operative Entfernung wurde bereits im Rahmen der Fallanalyse festgelegt

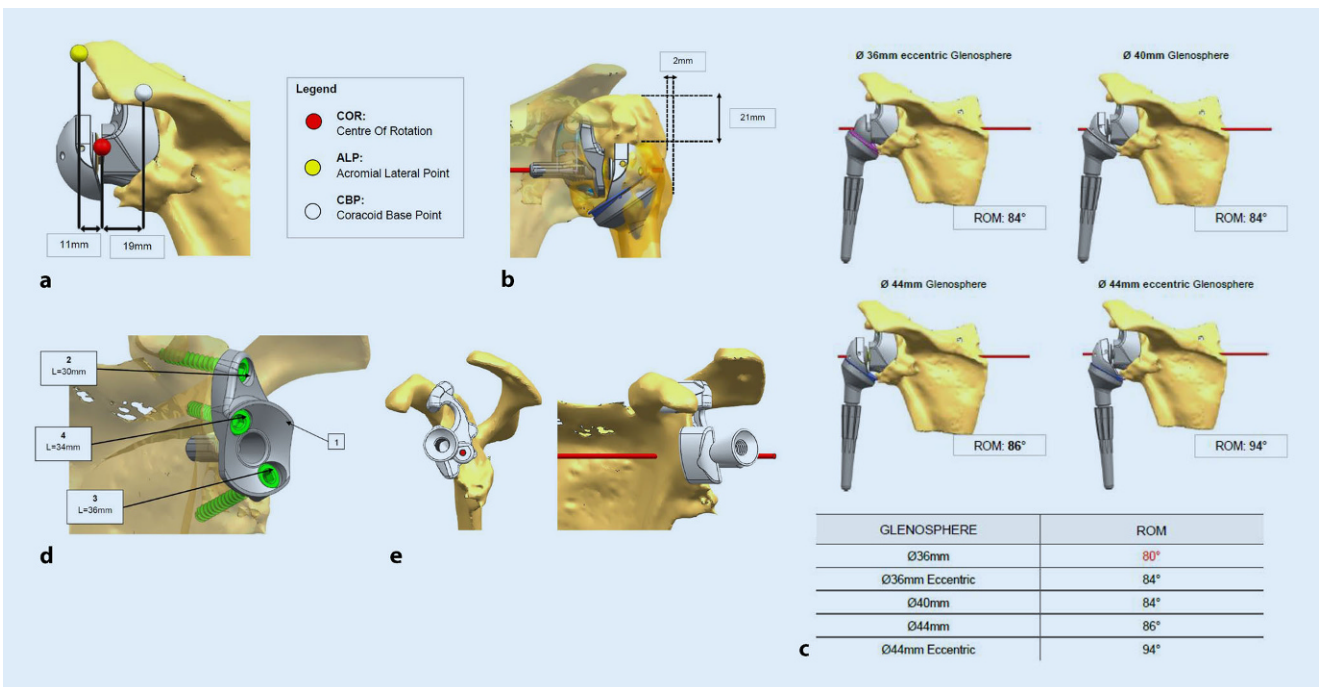


Abb. 6 ▲ **a** Visualisierung der biomechanischen Verhältnisse bei entsprechender Positionierung der glenoidalen Komponente (Patient 2). **b** Ausmaß an Lateralisierung und Distalisierung bei vorgegebener Glenosphärengröße. **c** Mögliche Bewegungsausmaße (Abduktion) bis zur Horizontalen nach geplanter Reposition der Schulterendoprothese in Abhängigkeit der verfügbaren Glenosphärengrößen. **d** Positionierung, Länge und Angulierung von 3 Schrauben. Eine geringe intraoperative Abweichung der tatsächlichen von der geplanten Schraubenlänge ist ein Indiz für eine präzise Lage des Glenoidimplantats. **e** PSI („patient specific instrumentation“)-Guide für zentralen Kirschner-Draht (rote Linie). Abstützung vornehmlich am gesunden, nichtalterierten Knochen

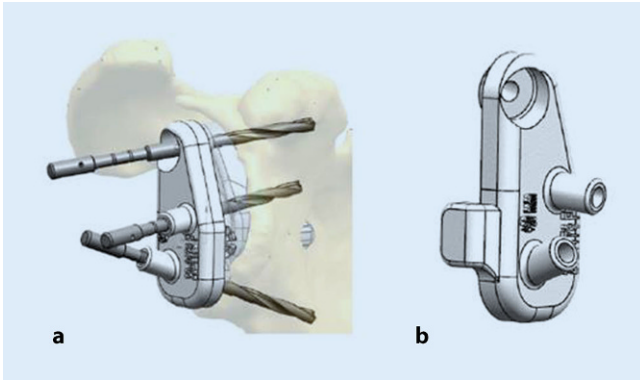


Abb. 7 ▲ **a, b** Individuell angefertigter PSI („patient specific instrumentation“)-Guide zur exakten Angulierung beim Vorbohren der Schrauben. Aufsatz auf das bereits eingebrachte definitive glenoidale Implantat

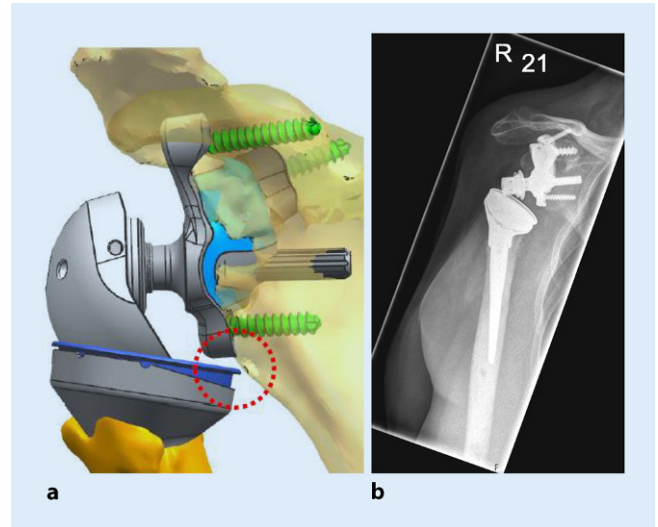


Abb. 8 ▲ **a** Visualisierung des inferioren Notchings (voraussichtlicher Berührungspunkt bei definierter Größe der Gleitpartner) bei großer metallischer Lateralisierung. Einbeziehung der Gefahr eines inferioren Hardware-auf-Hardware-Notchings erfolgt bereits bei Designüberlegungen. **b** Postoperatives röntgenologisches Ergebnis mit planungsgemäßer Umsetzung

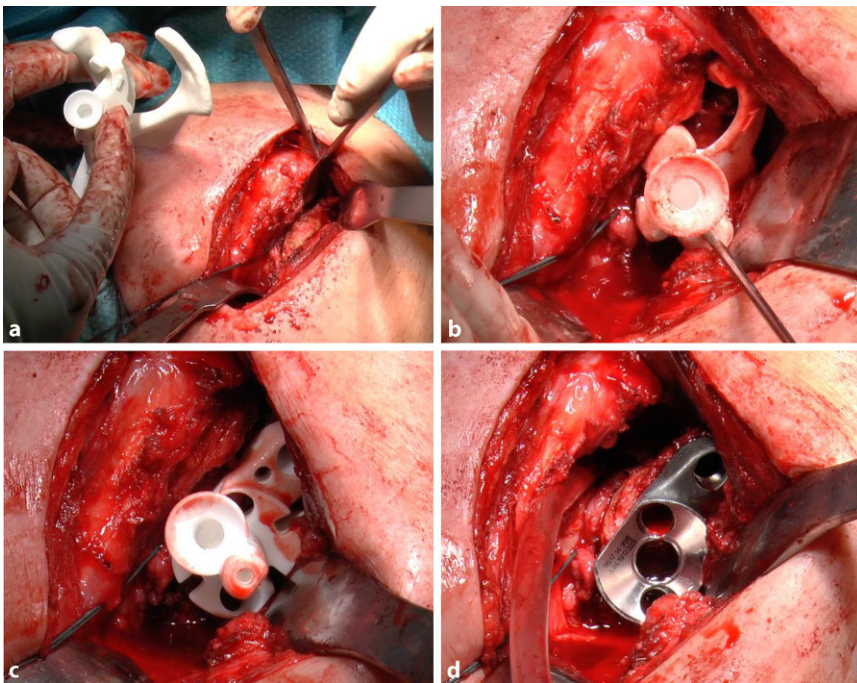


Abb. 9 ▲ **a** Visualisierung des Sitzes des PSI („patient specific instrumentation“)-Guides auf einem individuell angefertigten sterilen Skapulamodelle und Vergleich mit dem Situs (Patient 2). **b** Einbringen eines zentralen Kirschner-Drahts in vorgegebener Richtung nach sicherer Auflage des PSI-Guides. Die richtige Platzierung ist entscheidend für die Passgenauigkeit des definitiven Implantats. **c** Aufsetzen eines speziell für den Fall hergestellten Probeimplantats vor Implantation der metallischen Komponente und Prüfen auf satten kippelfreien Sitz. **d** Nach Platzierung des definitiven Implantats

wenig zeigten sich in diesen Untersuchungen Hinweise für glenoidale Lockerungen bzw. Versagen in der betreffenden Follow-up-Periode. In **Tab. 2** sind die entsprechenden Ergebnisse zusammengefasst. DeBeer et al. untersuchten weiterhin die Präzision der Positionierung des glenoidalen Implantats als Differenz zwischen präoperativer Planung und postoperativem radiologischem Ergebnis. Die durchschnittlichen Abweichungen betragen $6 \pm 4^\circ$ ($1-16^\circ$) in Bezug auf Version und $4 \pm 4^\circ$ ($0-11^\circ$) in Bezug auf Inklination [8].

Ein anderer biomechanischer Ansatz wird in einer Publikation von Chammaa et al. [6] verfolgt. In einem dem Hüftgelenk angelehnten und mittels CAM/CAD-Technik („computer-aided manufacturing/computer-aided design“) gefertigten glenoidalen Implantat wurde ein Polyethyleinsatz zementiert. Durchschnittlich 5 Jahre postoperativ konnten klinisch signifikante Verbesserungen (Oxford Shoulder Score 11 ± 8 auf 27 ± 11 ; $p < 0,001$) erreicht werden. Die postoperative Anteversion ist statistisch ebenfalls erhöht ($p < 0,001$), befindet sich mit $63 \pm 38^\circ$ jedoch immer noch auf einem niedrigen Niveau. Es wird eine Revisionsrate von 16% berichtet

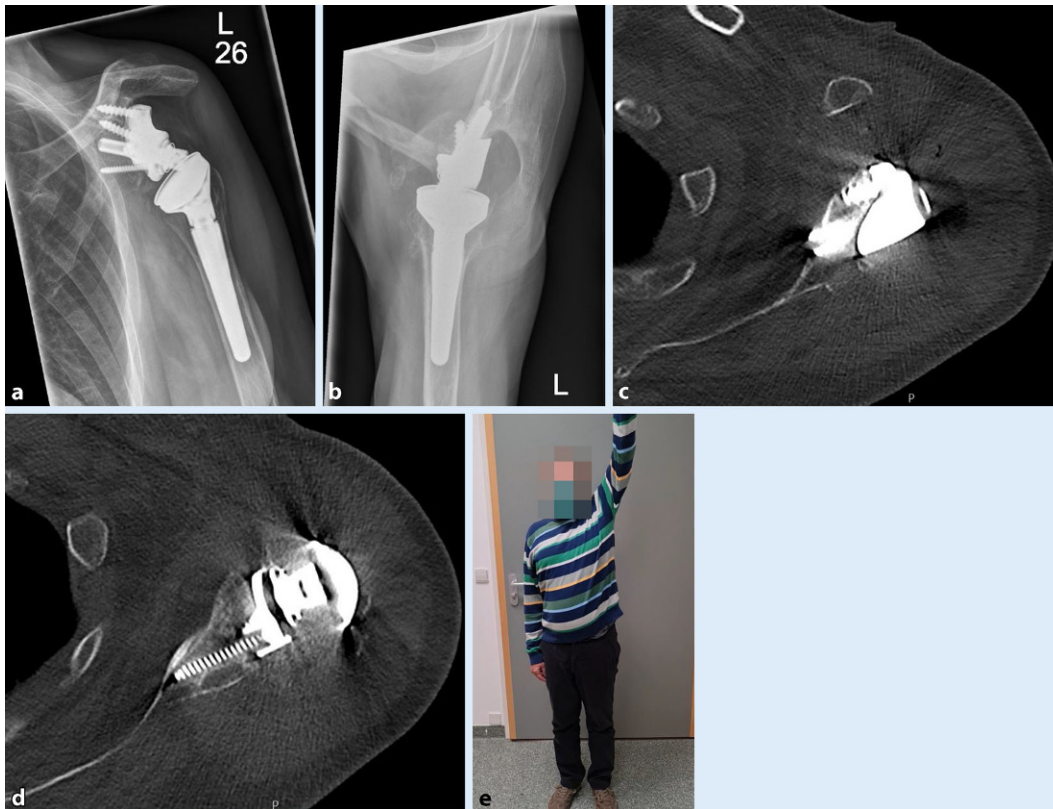


Abb. 10 ◀ **a, b** Postoperative Röntgenkontrolle (Patient 2, **Abb. 4, 5, 6 und 9**). Übrige Komponenten der Schulterendo-prothese sind Standardimplantate eines modularen Systems. **c, d** Postoperative Kontrolle mittels Computertomographie (CT, axiale Rekonstruktion). Zentraler Peg mit dezidiert Perforation der Kortikalis entsprechend präoperativer Planung. Inferiore Schraube mit intraossärer Lageplanungsgemäß. DICOM-Daten sind im Supplementary Material hinterlegt. **e** Klinischer Befund (Abduktion) 1 Jahr postoperativ

Tab. 2 Gegenüberstellung von Studienparametern und grob zusammengefassten Ergebnissen aktueller klinischer Studien patientenindividueller glenoidaler Implantate

Studie/ Autor	Im- plantat	Studien- design	Follow- up durch- schnittlich (Monate)	Anzahl <i>n</i> (Schul- tern/ Pati- enten)	Primär/ Revi- sion	Klinisches Outcome (Auszug)	Radio- logie	Komplikationen
Bodendorfer et al. (2020) [4]	VRS (Zimmer Biomet, Warsaw, IN, USA)	Retrospektiv, Multi-center	30 ± 9 (24–52)	12/11	7/5	ASES: präop. 33 (21–52), postop. 80 (67–94), Δ 45 (20–62), <i>p</i> = 0,002 SANE: präop. 30 (20–43), postop. 80 (58–90), Δ 43 (18–65), <i>p</i> = 0,004 Ante: präop. 95 (80–123), postop. 150 (140–160), Δ 20 (13–84), <i>p</i> = 0,009	Keine Hinweise für Lockerung	Keine
DeBeer et al. (2019) [8]	GGRS (Materialise NV, Leuven, Belgien)	Retrospektiv, Multi-center	30,5 (15–44)	10/10	4/6	CS: präop. n/a, postop. 41,3 ± 17,5 (18–76) SST: präop. n/a, postop. 47,5 ± 25,31 % (8–92 %)	Keine Hinweise für Lockerung	1-mal Plexus-Schaden, 1-mal Luxation
Porcellini et al. (2021) [30]	ProMade (LimaCorporate, San Daniele, Italien)	n/a	31,67 (25–38)	6/6	1/5	CS: präop. 15, postop. 24,8 ASES: präop. 15,3, postop. 45,8 Ante: präop. 41,7, postop. 62	2-mal Saumbildung	1-mal Subluxation
Rangarajan et al. (2020) [31]	VRS (Zimmer Biomet, Warsaw, IN, USA)	Retrospektiv, Single-center	18,2 (12–27)	18/18	8/10	CS: präop. 24,6 ± 10,2, postop. 60,4 ± 14,5, <i>p</i> < 0,001 ASES: präop. 32 ± 18,2, postop. 79 ± 15,6, <i>p</i> < 0,001 Ante: präop. 53 ± 27, postop. 124 ± 23, <i>p</i> < 0,001	Keine Hinweise für Lockerung	1-mal Infektion, 1-mal Luxation, 1-mal Perforation Humerusschaft, 1-mal Fraktur Tuberculum majus

Die Tabelle stellt Studienparameter und grob zusammengefasste Ergebnisse aktueller klinischer Studien patientenindividueller glenoidaler Implantate gegenüber. Die glenoidale Komponente ist dabei stets zementfrei fixiert. Die Publikationen beinhalten ausschließlich inverse Versorgungen VRS „(comprehensive) vault reconstruction system“, GGRS „glenius glenoid reconstruction system“, ASES American Shoulder and Elbow Surgeons Score, SANE Single Assessment Numeric Evaluation Score, Ante Anteversion, CS Constant-Murley Score

mit einem darin enthaltenen Fall einer glenoidalen Lockerung.

Anatomische Schulterendoprothesen in Verbindung mit patientenindividuellen Glenoiden bei ausgeprägten Knochendefekten sind bisher hauptsächlich in Fallberichten erwähnt und attestieren substanzielle klinische Verbesserungen kurz- bis mittelfristig (2,5 bzw. 4 Jahre) sowie radiologisch stabile Verhältnisse [9, 38]. Gunther und Lynch publizierten min. 3-Jahres-Ergebnisse von 7 Patienten nach Implantation eines zementierten CAM/CAD-gefertigten Glenoids in Primärsituationen mit 13–34° glenoidaler Retroversion mit ebenfalls signifikanter klinischer Verbesserung (ASES 25,6 ± 12,1 auf 94,1 ± 5,2; $p < 0,02$), ohne Anzeichen für glenoidale Lockerungen [18].

Fazit für die Praxis

- Die Indikation für patientenindividuelle 3-D-geprintete glenoidale Implantate besteht bei ausgeprägten Knochendefekten, bei welchen mit herkömmlichen Verfahren das Erreichen einer suffizienten Primärstabilität und/oder der angestrebten Implantatpositionierung nicht möglich sind.
- Mit diesem neuen Verfahren kann auch in schwierigen Ausgangssituationen ein präziser Defektwiederaufbau mit stabiler Verankerung sowie präziser Positionierung entsprechend der präoperativen Planung erreicht werden.
- Die präoperative computergestützte Planung („surgery before the surgery“) ist von großem Wert und bietet die Möglichkeiten, sowohl das Implantatdesign als auch weitere wesentliche Aspekte der Operation zu visualisieren und zu konzeptionieren.
- Die bisherigen kurzfristigen Studienergebnisse sind ermutigend.
- Weitere Untersuchungen sind notwendig, um die Evidenz des Verfahrens zu erhöhen und damit auch in Bezug auf die Vergütung eine solide Argumentationsgrundlage zu schaffen.

Korrespondenzadresse

Dr. med. M. Petermann

Orthopädisch-Traumatologisches-Zentrum,
HELIOS Park-Klinikum Leipzig
Strümpellstr. 41, 04289 Leipzig, Deutschland
martin.petermann@helios-gesundheit.de

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. M. Petermann und J. Agneskirchner haben einen Beratervertrag mit der Fa. LimaCorporate.

Für diesen Beitrag wurden von den Autoren keine Studien an Menschen oder Tieren durchgeführt. Für die aufgeführten Studien gelten die jeweils dort angegebenen ethischen Richtlinien.

Funding Die Veröffentlichung dieses Beitrags wurde durch die Helios Forschungsförderung unterstützt, Grant-ID: 2021-018.

Open Access. Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen. Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

1. Antuna SA, Sperling JW, Cofield RH, Rowland CM (2001) Glenoid revision surgery after total shoulder arthroplasty. *J Shoulder Elbow Surg* 10(3):217–224. <https://doi.org/10.1067/mse.2001.113961>
2. Australian Orthopaedic Association National Joint Replacement Registry (AOANJRR) (2019) Hip, knee & shoulder arthroplasty: 2019 annual report. AOA, Adelaide, S 266–331
3. Bercik MJ, Kruse K, Yazilic M, Gauci MO, Chaoui J, Walch G (2016) A modification to the Walch classification of the glenoid in primary glenohumeral osteoarthritis using three-dimensional imaging. *J Shoulder Elbow Surg* 25(10):1601–1606. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2016.03.010>
4. Bodendorfer BM, Loughran GJ, Looney AM, Velott AT, Stein JA, Lutton DM et al (2020) Short-term outcomes of reverse shoulder arthroplasty using a custom baseplate for severe glenoid deficiency. *J Shoulder Elbow Surg*. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2020.08.002>
5. Boileau P, Gauci MO, Wagner ER, Clowez G, Chaoui J, Chelli M et al (2019) The reverse shoulder

arthroplasty angle: a new measurement of glenoid inclination for reverse shoulder arthroplasty.

- J Shoulder Elbow Surg* 28(7):1281–1290. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2018.11.074>
6. Chammaa R, Uri O, Lambert S (2017) Primary shoulder arthroplasty using a custom-made hip-inspired implant for the treatment of advanced glenohumeral arthritis in the presence of severe glenoid bone loss. *J Shoulder Elbow Surg* 26(1):101–107. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2016.05.027>
 7. Cofield RH (2007) Bone grafting for glenoid bone deficiencies in shoulder arthritis: a review. *J Shoulder Elbow Surg* 16(5):S273–81. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2007.03.005>
 8. Debeer P, Berghs B, Pouliart N, Van den Bogaert G, Verhaegen F, Nijs S (2019) Treatment of severe glenoid deficiencies in reverse shoulder arthroplasty: the glenoid reconstruction system experience. *J Shoulder Elbow Surg* 28(8):1601–1608. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2018.11.061>
 9. Dines DM, Gulotta L, Craig EV, Dines JS (2017) Novel solution for massive glenoid defects in shoulder arthroplasty: a patient-specific glenoid vault reconstruction system. *Am J Orthop (Belle Mead NJ)* 46(2):104–108
 10. Falaise V, Levisse C, Favard L (2011) Scapular notching in reverse shoulder arthroplasties: the influence of glenometaphyseal angle. *Orthop Traumatol Surg Res* 97(6):S131–7. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2011.06.007>
 11. Favre P, Sussmann PS, Gerber C (2010) The effect of component positioning on intrinsic stability of the reverse shoulder arthroplasty. *J Shoulder Elbow Surg* 19(4):550–556. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2009.11.044>
 12. Frankle MA, Teramoto A, Luo Z-P, Levy JC, Puppello D (2009) Glenoid morphology in reverse shoulder arthroplasty: classification and surgical implications. *J Shoulder Elbow Surg* 18(6):874–885. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2009.02.013>
 13. Gates S, Cutler H, Khazzam M (2019) Outcomes of posterior glenoid bone-grafting in anatomical total shoulder arthroplasty: a systematic review. *JBJS Rev* 7(9):e6. <https://doi.org/10.2106/JBJS.RVW.19.00005>
 14. Gohlke F, Werner B (2017) Humeral and glenoid bone loss in shoulder arthroplasty: classification and treatment principles. *Orthopaede* 46(12):1008–1014. <https://doi.org/10.1007/s00132-017-3484-5>
 15. Gohlke F, Werner B, Wiese I (2019) Glenoid reconstruction in revision shoulder arthroplasty. *Oper Orthop Traumatol* 31(2):98–114. <https://doi.org/10.1007/s00064-019-0594-8>
 16. Ghorraishian M, Abboud JA, Romeo AA, Williams GR, Namdari S (2019) Augmented glenoid implants in anatomic total shoulder arthroplasty: review of available implants and current literature. *J Shoulder Elbow Surg* 28(2):387–395. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2018.08.017>
 17. Guery J, Favard L, Sirveaux F, Oudet D, Mole D, Walch G (2006) Reverse total shoulder arthroplasty. Survivorship analysis of eighty replacements followed for five to ten years. *J Bone Joint Surg Am* 88(8):1742–1747. <https://doi.org/10.2106/JBJS.E.00851>
 18. Gunther SB, Lynch TL (2012) Total shoulder replacement surgery with custom glenoid implants for severe bone deficiency. *J Shoulder Elbow Surg* 21(5):675–684. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2011.03.023>
 19. Gupta A, Thussbas C, Koch M, Seebauer L (2018) Management of glenoid bone defects with

- reverse shoulder arthroplasty-surgical technique and clinical outcomes. *J Shoulder Elbow Surg* 27(5):853–862. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2017.10.004>
20. Hill JM, Norris TR (2001) Long-term results of total shoulder arthroplasty following bone-grafting of the glenoid. *J Bone Joint Surg Am* 83(6):877–883
 21. Ho JC, Thakar O, Chan WW, Nicholson T, Williams GR, Namdari S (2019) Early radiographic failure of reverse total shoulder arthroplasty with structural bone graft for glenoid bone loss. *J Shoulder Elbow Surg*. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2019.07.035>
 22. Hsu JE, Ricchetti ET, Huffman GR, Iannotti JP, Glaser DL (2013) Addressing glenoid bone deficiency and asymmetric posterior erosion in shoulder arthroplasty. *J Shoulder Elbow Surg* 22(9):1298–1308. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2013.04.014>
 23. Laver L, Garrigues GE (2014) Avoiding superior tilt in reverse shoulder arthroplasty: a review of the literature and technical recommendations. *J Shoulder Elbow Surg* 23(10):1582–1590. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2014.06.029>
 24. Levine WN, Djurasovic M, Glasson JM, Pollock RG, Flatow EL, Bigliani LU (1997) Hemiarthroplasty for glenohumeral osteoarthritis: results correlated to degree of glenoid wear. *J Shoulder Elbow Surg* 6(5):449–454. [https://doi.org/10.1016/s1058-2746\(97\)70052-1](https://doi.org/10.1016/s1058-2746(97)70052-1)
 25. Michael RJ, Schoch BS, King JJ, Wright TW (2018) Managing glenoid bone deficiency—the augment experience in anatomic and reverse shoulder arthroplasty. *Am J Orthop*. <https://doi.org/10.12788/ajo.2018.0014>
 26. National joint registry for England, Wales, Northern Ireland and the Isle of Man (NJR EWNIIM) (2018) 15th annual report 2018, S159
 27. Neyton L, Kirsch JM, Collotte P, Collin P, Gossing L, Chelli M et al (2019) Mid- to long-term follow-up of shoulder arthroplasty for primary glenohumeral osteoarthritis in patients aged 60 or under. *J Shoulder Elbow Surg* 28(9):1666–1673. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2019.03.006>
 28. Nyffeler RW, Werner CM, Gerber C (2005) Biomechanical relevance of glenoid component positioning in the reverse delta III total shoulder prosthesis. *J Shoulder Elbow Surg* 14(5):524–528. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2004.09.010>
 29. Oppermann J, Celik E, Bredow J, Beyer F, Hackl M, Spies CK et al (2016) Shoulder arthroplasty in Germany: 2005–2012. *Arch Orthop Trauma Surg* 136(5):723–729. <https://doi.org/10.1007/s00402-016-2417-9>
 30. Porcellini G, Micheloni GM, Tarallo L, Paladini P, Merolla G, Catani F (2021) Custom-made reverse shoulder arthroplasty for severe glenoid bone loss: review of the literature and our preliminary results. *J Orthop Traumatol* 22(1):2. <https://doi.org/10.1186/s10195-020-00564-6>
 31. Rangarajan R, Blout CK, Patel VV, Bastian SA, Lee BK, Itamura JM (2020) Early results of reverse total shoulder arthroplasty using a patient-matched glenoid implant for severe glenoid bone deficiency. *J Shoulder Elbow Surg* 29(7S):S139–S148. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2020.04.024>
 32. Rasmussen JV, Harjula J, Arverud ED, Hole R, Jensen SL, Brorson S et al (2019) The short-term survival of total stemless shoulder arthroplasty for osteoarthritis is comparable to that of total stemmed shoulder arthroplasty: a nordic arthroplasty register association study. *J Shoulder Elbow Surg* 28(8):1578–1586. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2019.01.010>
 33. Sandow MJ, David H, Bental SJ (2013) Hemiarthroplasty vs total shoulder replacement for rotator cuff intact osteoarthritis: how do they fare after a decade? *J Shoulder Elbow Surg* 22(7):877–885. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2012.10.023>
 34. Scalise JJ, Iannotti JP (2008) Bone grafting severe glenoid defects in revision shoulder arthroplasty. *Clin Orthop Relat Res* 466(1):139–145. <https://doi.org/10.1007/s11999-007-0065-563>
 35. Sirveaux F, Favard L, Oudet D, Huquet D, Walch G, Molé D (2004) Grammont inverted total shoulder arthroplasty in the treatment of glenohumeral osteoarthritis with massive rupture of the cuff. Results of a multicentre study of 80 shoulders. *J Bone Joint Surg Br* 86(3):388–395. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.86b3.14024>
 36. Steinmann SP, Cofield RH (2000) Bone grafting for glenoid deficiency in total shoulder replacement. *J Shoulder Elbow Surg* 9(5):361–367. <https://doi.org/10.1067/mse.2000.106921>
 37. Stephens SP, Paisley KC, Jeng J, Dutta AK, Wirth MA (2015) Shoulder arthroplasty in the presence of posterior glenoid bone loss. *J Bone Joint Surg Am* 97(3):251–259. <https://doi.org/10.2106/JBJS.N.00566>
 38. Stoffelen DVC, Eraly K, Debeer P (2015) The use of 3D printing technology in reconstruction of a severe glenoid defect: a case report with 2.5 years of follow-up. *J Shoulder Elbow Surg* 24(8):e218–222. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2015.04.006>
 39. Valenti P, Sauzières P, Katz D, Kalouche I, Kilinc AS (2011) Do less medialized reverse shoulder prostheses increase motion and reduce notching? *Clin Orthop Relat Res* 469(9):2550–2557. <https://doi.org/10.1007/s11999-011-1844-8>
 40. Walch G, Badet R, Boulahia A, Houry A (1999) Morphologic study of the glenoid in primary glenohumeral osteoarthritis. *J Arthroplasty* 14(6):756–760. [https://doi.org/10.1016/s0883-5403\(99\)90232-2](https://doi.org/10.1016/s0883-5403(99)90232-2)
 41. Walch G, Moraga C, Young A, Castellanos-Rosas J (2012) Results of anatomic nonconstrained prosthesis in primary osteoarthritis with biconcave glenoid. *J Shoulder Elbow Surg* 21(11):1526–1533. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2011.11.030>
 42. Westermann RW, Pugely AJ, Martin CT, Gao Y, Wolf BR, Hettrich CM (2015) Reverse shoulder arthroplasty in the United States: a comparison of national volume, patient demographics, complications, and surgical indications. *Iowa Orthop J* 35:1–7
 43. Williams GR, Iannotti JP (2007) Options for glenoid bone loss: composites of prosthetics and biologics. *J Shoulder Elbow Surg* 16(5):S267–72. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2007.05.003>
 44. Gauci MO, Cavalier M, Gonzalez JF, Holzer N, Baring T, Walch G et al (2020) Revision of failed shoulder arthroplasty: epidemiology, etiology, and surgical options. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery* 29(3):541–549
 45. Young A, Walch G, Boileau P, Favard L, Gohlke F, Loew M et al (2011) A multicentre study of the long-term results of using a flat-back polyethylene glenoid component in shoulder replacement for primary osteoarthritis. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume* 93-B(2):210–216
 46. Fevang BT, Lie SA, Havelin LI, Skredderstuen A, Furnes O (2009) Risk factors for revision after shoulder arthroplasty. *Acta Orthopaedica* 80(1):83–91
 47. Denard PJ, Lederman E, Parsons BO, Romeo AA (2017) Finite element analysis of glenoid-sided lateralization in reverse shoulder arthroplasty. *Journal of Orthopaedic Research* 35(7):1548–1555