

Obere Extremität 2020 · 15:179–186
<https://doi.org/10.1007/s11678-020-00580-2>
 Eingegangen: 19. Februar 2020
 Angenommen: 20. Mai 2020
 Online publiziert: 24. Juni 2020
 © Der/die Autor(en) 2020



J. Schmalz · C. Gerhardt · L. J. Lehmann

Abteilung für Unfall- und Handchirurgie, St. Vincentius Klinik, ViDia Kliniken, Karlsruhe, Deutschland

Dreidimensionale Planung und Verwendung patientenspezifischer Instrumentierung (PSI) in der Schultertotalendoprothetik

Hintergrund

Die Anatomie der Skapula ist häufig inkonsistent, denn die Stellung der Fossa glenoidalis im Raum, d. h. Retroversion und Inklination, sowie die Form ändern sich mit fortschreitender Arthrose. Die bildgebende Darstellung ist daher in vielen Fällen unzureichend genau, um eine exakte Planung der Prothesenpositionierung zu ermöglichen. Funktion und Standzeit anatomischer und inverser Endoprothetik wird dabei weitestgehend von der anatomischen und stabilen Fixierung der Glenoidkomponente determiniert.

Wesentliche Voraussetzungen diese Werte zu verbessern sind einerseits die präzise Korrektur der Glenoiddeformität und andererseits die sichere Implantationstechnik.

Die Lockerung der Glenoidkomponente stellt aktuell den häufigsten Grund für ein Prothesenversagen in der anatomischen Totalendoprothetik dar [10]. Mögliche Ursachen für ein frühzeitiges Versagen können u. a. Fehlpositionierung, inkomplette oder unzureichende Korrektur pathologischer Glenoidveränderungen, persistierende Humeruskopfsubluxation oder -dezentrierung sowie Insuffizienz der Rotatorenmanschette sein. Eine fehlgeschlagene Korrektur der pathologischen Glenoidversion und Platzierung der Glenoidkomponente in $>15^\circ$ Retroversion können zu einer frühen Osteolyse und Lockerung um die Komponente führen [10]. Ursächlich

hierfür sind die persistierende posteriore Dezentrierung des Humeruskopfes und eine damit verbundene exzentrisch posteriore Belastung der Glenoidkomponente [16].

Mögliche Gründe für eine Fehlpositionierung sind inakkurate Analyse der pathologischen Anatomie, fehlerhafte Implantatwahl oder inkorrekte Umsetzung der präoperativen Planung durch unzureichende intraoperative Exposition.

Nachdem unterschiedliche Prothesendesigns (Keel vs. Peg, augmentiert vs. unaugmentiert) und Fixierungstechniken (zementiert vs. zementfrei; Schraube vs. Peg) diskutiert wurden und werden, konnte (2012 erstmals durch Joseph Iannotti beschrieben) mithilfe einer „patientenspezifischen Instrumentierung“ die Genauigkeit der Fixierungstechnik und die Platzierung der Glenoidkomponente richtungsweisend verbessert werden.

Ziel dieser Techniken ist:

- die Glenoidanatomie bestmöglich wiederherzustellen,
- den subchondralen Knochenverlust möglichst zu minimieren,
- die Gelenklinie möglichst wenig weiter zu medialisieren,
- eine optimale Positionierung und Fixierung der Implantate zu erzielen,
- möglichst wenig mechanische Stressbelastung auf das Implantat zu bringen.

Finite-Elemente-Analysen zeigen, dass eine Retroversion der Komponenten $>10^\circ$ zu hohen Spannungen an der Grenzfläche zwischen Knochen und Implantat führt [5]. In einer biomechanischen Studie von Gutiérrez et al. [7] konnte außerdem gezeigt werden, dass bei lateralisierten und konzentrischen Glenosphärendesign ein superiorer Tilt in einer vermehrte Entstehung von Scherkräften resultiert, was in einer frühzeitigen Lockerung der Glenoidkomponente resultieren kann. Auf der Grundlage dieser Studien erachten wir die Implantatlage als ideal, wenn die Retroversion zwischen 0° und 10° liegt und das Implantat einen inferioren Tilt in Bezug auf die Skapulabene aufweist.

Genauigkeit patientenspezifischer Instrumentierung

Die ideale Position für die Platzierung einer Glenoidkomponente in einem Patienten oder das beste Implantat, um dies zu erreichen, wurde bisher nicht definiert. Die meisten Chirurgen versuchen, die pathologische Neigung oder Version durch exzentrisches „reamen“, Verwendung von augmentierten Glenoidkomponenten, Einsatz von Knochentransplantaten oder eine Kombination dieser Methoden zu korrigieren. Dementsprechend spielt die Genauigkeit der Prothesenpositionierung eine entscheidende Rolle und es gilt zu analysieren, ob der Einsatz von PSI diese beeinflusst.

Tab. 1 Versionsfehler und Inklinationsfehler in Grad nach patientenspezifischer Instrumentierung verglichen mit Kontrollen nach Standardinstrumentierung

Autor (Jahr)	Versionsfehler		Inklinationsfehler	
	PSI (SD)	Kontrolle (SD)	PSI (SD)	Kontrolle (SD)
Hendel (2012) [8]	2,9 (±3,4)	11,6 (±7,0)	4,3 (±4,5)	6,9 (±4,5)
Iannotti (2014) [11]	2,8 (±2,1)	10,7 (±5,8)	3,1 (±2,6)	11,1 (±2,6)
Lewis (2015) [15]	2,7 (±2,4)	7,8 (±6,1)	2,6 (±1,4)	8,9 (±1,3)
Throckmorton (2015) [18]	3,0 (±4,3)	7,0 (±7,9)	5,0 (±4,8)	8,0 (±4,8)
Throckmorton (2015) [18]	3,0 (±4,6)	5,0 (±6,3)	6,0 (±7,0)	6,0 (±7,0)
Eraly (2016) [4]	1,2 (±1,2)	2,8 (±1,8)	1,8 (±1,2)	3,5 (±1,2)
Berhouet (2017) [1]	0,1 (±0,5)	11,7 (±8,1)	0,5 (±0,7)	6,1 (±0,7)
Iannotti (2017) [12]	2,2 (±1,8)	11,1 (±7,0)	4,5 (±1,5)	6,4 (±1,5)

SD Standardabweichung, PSI patientenspezifische Instrumentierung

Tab. 2 Aktuell verfügbare PSI-Systeme mit Angabe von Hersteller und spezifischen Angaben zu den Eigenschaften der unterschiedlichen Planungstools

Programm	Firma	Glenoid	Humerus	ROM	Intraartikuläre Orientierung der Schablone	Extraartikuläre Orientierung der Schablone	Planung kostenfrei
Blueprint™	Wright Medical/Tornier	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja
Materialise True-match™	DePuy Synthes	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein
Materialise Match Point™	DJO	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein
Materialise TrueSight	Stryker	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein
Materialise Affinis Architec	Mathys	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein
Zimmer® PSI System	Zimmer Biomet	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein
Virtual Implant Positioning™ (VIP)	Arthrex	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein

PSI patientenspezifische Instrumentierung

Die überwiegende Mehrheit aller verfügbaren Publikationen über patientenspezifische Instrumentierung (PSI) in der Schulterendoprothetik beschreibt eine mittlere postoperative Version und Inklination von $\leq 5^\circ$ im Vergleich zur präoperativen Planung (Tab. 1; [1, 3, 4, 6, 8, 9, 11–15, 17–19]). Alle Artikel, in denen PSI und Standardinstrumentierung verglichen wurde, zeigten für die PSI entweder eine signifikant reduzierte Fehleranfälligkeit oder eine signifikant erhöhte Wahrscheinlichkeit, die geplante präoperative Position zu erreichen [1, 4, 8, 9, 11–13, 15, 18].

Im Gegenteil dazu zeigte eine kürzlich als Reviewarbeit veröffentlichte gepoolte Analyse zu PSI keinen signifikanten Unterschied in der Genauigkeit zwischen

PSI und Standardinstrumentierung im direkten Vergleich [2].

Eine mögliche Erklärung für das Fehlen signifikanter Unterschiede zwischen der PSI und der Genauigkeit der Standardinstrumente liegt in der Erfahrung der Operateure. Diejenigen Chirurgen, die an einem Großteil der genannten Studien beteiligt waren, führen regelmäßig und in hoher Fallzahl Schulterarthroplastiken durch [11, 13, 18, 19]. Aufgrund der gesteigerten operativen Erfahrung hatten sie möglicherweise eine höhere Genauigkeit und verringerte Variabilität mit Standardinstrumenten, was die Diskrepanz zwischen PSI und Standardinstrumentierung in ihren Händen verringert.

Eine zweite mögliche Erklärung ist, dass viele der Studien an Glenoiden mit wenig komplexer Morphologie durchge-

führt wurden, als dies normalerweise in der klinischen Praxis der Fall wäre. Standardinstrumente zeigten bei stark destruierten Glenoiden mit ausgeprägter Retroversion und Inklination ein signifikant schlechteres Ergebnis als PSI [8, 12, 15].

Darüber hinaus sind die in der Literatur beschriebenen PSI-Techniken und die postoperative Evaluation sehr variabel. Beispielsweise sind die Mechanismen der Fixierung auf der Glenoidfläche extrem unterschiedlich. Einige Instrumente erfordern einen Kontakt zwischen einzelnen und mehreren Kontaktpunkten auf dem Glenoidrand, im Gegensatz dazu ist bei anderen der Kontakt mit zusätzlichen anatomischen Strukturen wie der Korakoidbasis oder dem Akromion nötig. Obwohl Konstruktionsunterschiede die Genauigkeit insgesamt nicht wesentlich zu

beeinträchtigen scheinen, wurde das Abschneiden der verschiedenen PSI-Techniken noch nie miteinander verglichen, was die rationale Entscheidungsfindung für eine bestimmte PSI-Technik nahezu unmöglich macht. Das Fehlen einer einheitlichen postoperativen radiologischen Evaluation erschwert den direkten Vergleich zusätzlich, da die Abweichung von der präoperativ geplanten Positionierung je nach Präferenz der Autoren auf postoperativen Röntgenbildern, 2D-CT-Bildern und 3D-Rekonstruktionen gemessen wurde.

Insgesamt lässt die verfügbare Literatur darauf schließen, dass sich die Genauigkeit mittels PSI verbessert, was dazu führt, dass postoperative Versions- oder Neigungsfehler vermieden werden können. Insbesondere bei komplexer Glenoidmorphologie scheint der Einsatz von PSI von Nutzen zu sein. Allerdings hat bisher keine Studie eine Korrelation zwischen verbesserten klinischen Ergebnissen und der Verwendung von PSI gezeigt.

Einfluss der Erfahrung bzw. des Ausbildungsstands

Eine Studie von Iannotti et al. [11] ergab, dass die Implantationsgenauigkeit durch die Erfahrung des Chirurgen bei der Verwendung von PSI erheblich beeinflusst wurde, wobei die postoperative Fehlpositionierung besonders bei weniger erfahrenen Chirurgen durch den Einsatz von PSI minimiert werden kann.

Verfügbare Techniken

Die hier getroffene Auswahl soll beispielhaft die Unterschiede der auf dem Markt verfügbaren Systeme aufzeigen und stellt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Des Weiteren wollen wir bewusst auf eine Bewertung der unterschiedlichen Instrumentarien verzichten. Naturgemäß ist insbesondere der Umgang mit der angebotenen Software sehr subjektiv im Auge des Betrachters respektive des Anwenders.

Grundsätzlich muss zwischen intraoperativer Navigation und PSI unterschieden werden. Obgleich der Fokus dieser Übersicht auf dem Thema PSI liegt, soll die Navigation dennoch Er-

Obere Extremität 2020 · 15:179–186 <https://doi.org/10.1007/s11678-020-00580-2>
© Der/die Autor(en) 2020

J. Schmalzl · C. Gerhardt · L. J. Lehmann

Dreidimensionale Planung und Verwendung patientenspezifischer Instrumentierung (PSI) in der Schultertotalendoprothetik

Zusammenfassung

Eine dreidimensionale (3D-)Darstellung des Glenoids ermöglicht durch das verbesserte Verständnis der pathologischen Glenoidmorphologie im Hinblick auf Version und Neigung eine genauere Planung und eine optimalere Positionierung der Glenoidkomponente. Die Glenoidkomponente bleibt die häufigste Ursache des späten Versagens nach anatomischer Schultertotalendoprothetik. Mögliche Gründe für eine Fehlpositionierung der Glenoidkomponente sind eine ungenaue Einschätzung der pathologischen Anatomie des Glenoids, falsche Wahl und/oder inkorrekte Positionierung des Implantats und mangelhafte chirurgische Ausführung der präoperativen Planung. Aufgrund der Einschränkungen von Standardröntgenbildern verwenden viele Chirurgen zweidimensionale(2D)-CT-Scans

zur Bewertung der Glenoidmorphologie und -version. Mehrere Studien haben jedoch gezeigt, dass 3D-CT-Rekonstruktionen für den Chirurgen die Anatomie genauer und zuverlässiger darstellen als 2D-Scans – insbesondere in Fällen ausgeprägter ossärer Defektsituationen. Mithilfe von 3D-Planungen kann der Chirurg das zu verwendende Implantat auswählen und die optimale Platzierung festlegen, um den pathologischen Zustand zu korrigieren bzw. das Implantat zu fixieren. Wir beschreiben die für die 3D-Planung verfügbaren Planungssysteme, die Planungsprinzipien und die Vorgehensweise.

Schlüsselwörter

Glenoiddefekt · Schulterprothese · Omarthrose · Glenoid · Basisplatte

Three-dimensional planning and use of patient-specific instrumentation (PSI) in total shoulder arthroplasty

Abstract

Three-dimensional (3D) templating of the glenoid in total shoulder arthroplasty allows for more accurate planning and better positioning of the glenoid component through an improved understanding of the pathologic glenoid morphology, version, and inclination in reference to an idealized calculated glenoid position. Loosening of the glenoid component remains the most common mode of late failure after anatomic total shoulder arthroplasty. Reasons for malposition of the glenoid component might be inaccurate assessment of the pathologic anatomy of the glenoid, incorrect choice and/or position of the implant to correct the pathologic condition, and inaccurate surgical execution of the preoperative plan. Because of the limitations of standard radiographs,

many surgeons use two-dimensional (2D) CT scans to evaluate glenoid morphology and version. However, multiple studies have shown that 3D CT scans are more accurate and reliable than 2D scans, particularly in the face of advanced osseous defects. With the use of 3D CT templating, the surgeon can select the implant and define the optimal placement of that implant to correct the pathologic condition. We describe the available commercial systems used for advanced 3D CT templating, the principles of planning and the procedure.

Keywords

Glenoid defect · Schulter prosthesis · Osteoarthritis · Glenoid · Base plate

wähnung finden. Aktuell auf dem Markt verfügbar ist einzig die Technik der Fa. Exactech. Analog zur später ausführlich beschriebenen Technik wird ein CT-Datensatz online zur Verfügung gestellt und in eine Planungssoftware integriert. Im Gegensatz zur PSI kann diese Planung dem Operateur nun in „real time“ im

Operationssaal zur Verfügung gestellt werden. Dazu werden optische GPS-Geräte am Schultergürtel knöchern fixiert und die knöchernen Landmarken definiert, bis eine virtuelle Landkarte des Operationssitus auf dem Bildschirm verfügbar ist und mit der präoperativen CT-Planung gematcht werden kann. An-

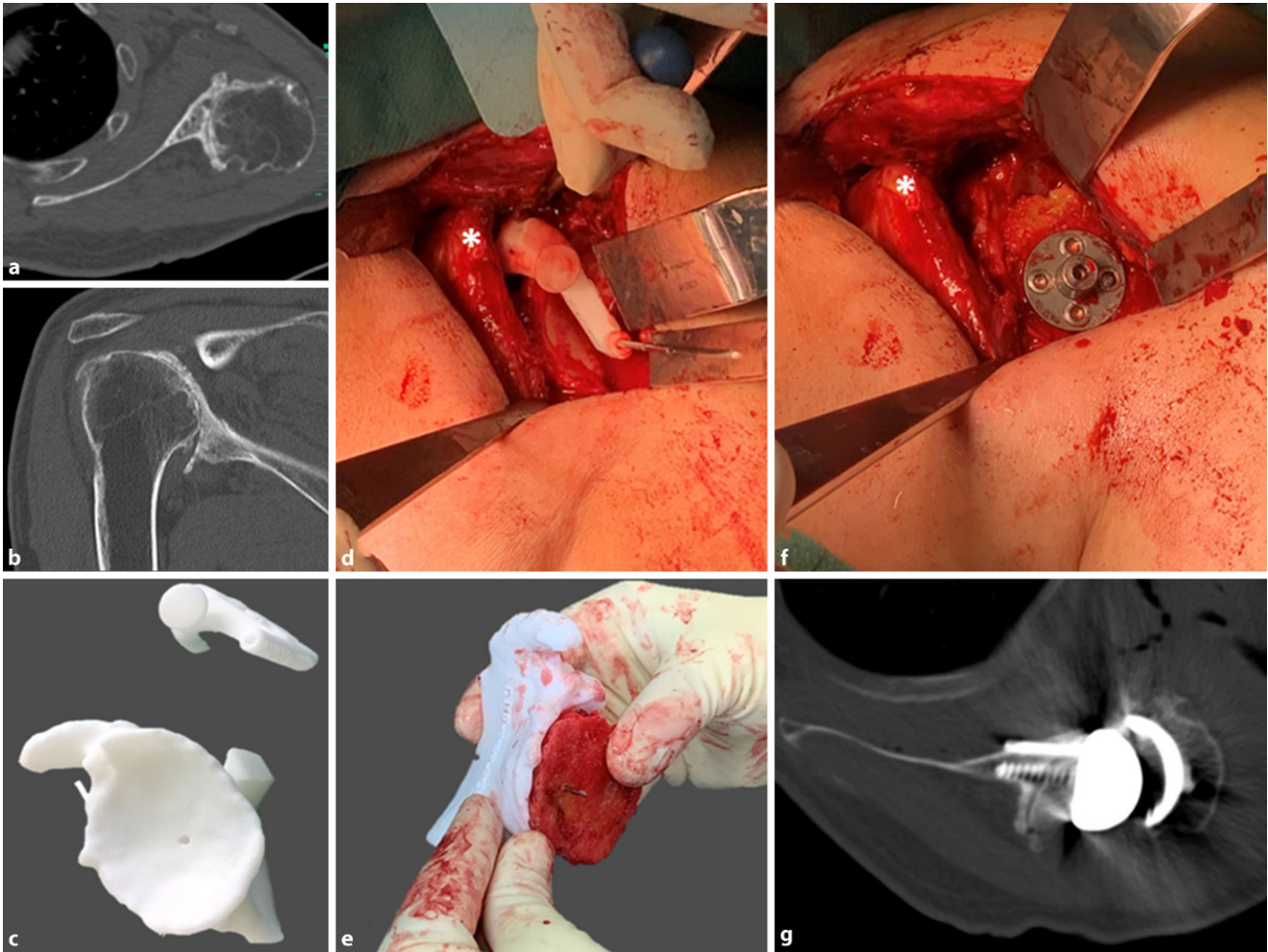


Abb. 1 ▲ Fallbeispiel einer patientenspezifischen Instrumentierung nach präoperativer Planung mit Matchpoint (Fa. DJO) bei einem Patienten mit einer Glenoidkonfiguration Typ B3 nach Walch (a) und Typ E1 nach Huguët/Favard (b). Mittels dreidimensionalem (3D-)Druck wurden ein Replikat des Glenoids sowie eine Bohrschablone erstellt (c). Diese wird intraoperativ an der Korakoidbasis ausgerichtet (d). Der *weiße Stern* markiert den *Prozess coracoideus* (c, d). Die Auffüllung des Glenoiddefekts erfolgte mit dem resezierten Humeruskopf, wobei das Graft mit Hilfe des Glenoidreplikats exakt präpariert werden kann (e). Anschließend wurde das Graft über den vorgebohrten Kirschner-Draht eingebracht und mittels der „base plate“ fixiert (f). Im postoperativen CT zeigt sich eine optimale Lage der zentralen Schraube sowie eine vollständige Auffüllung der glenoidalen Defektzone durch das Graft (g)

hand dessen kann der Chirurg während der Operation über den Bildschirm die Positionierung der Glenoidkomponente und ggf. die Bohrrichtung der Schrauben entsprechend der präoperativ erstellten Planung unter visueller Kontrolle durchführen. Ein beispielhafter Fall wird in **Abb. 3** demonstriert.

Im Gegensatz dazu lässt die präoperative Prothesenplanung mit Systemen wie z. B. *medicAD® Shoulder 3D* (*medicAD Hectec GmbH, Landshut, Deutschland*) die Prothesenplanung fast aller gängiger Prothesenmodelle zu, nicht jedoch die spezifische Instrumentierung.

Für die PSI-Planung an der Schulter stehen aktuell unterschiedliche Programme zur Verfügung, die im Gegensatz zur alleinigen Planungssoftware an ein einzelnes Prothesensystem gekoppelt sind und daher von einer spezifischen Firma gebunden an deren Prothesensystem kostenfrei oder kostenpflichtig zur Verfügung gestellt werden. Nach Übermittlung des CT-Datensatzes kann der Chirurg über die Software der entsprechenden Firma auf die virtuelle Planung zugreifen und diese bei Bedarf auch modifizieren. Je nach Hersteller und Verfügbarkeit kann er zwischen verschiedenen Prothesendesigns wählen und bei

Bedarf eine metallische oder knöcherne Glenoidaugmentationen simulieren. Außerdem kann hierbei über die Lateralisierung und Distalisierung entschieden werden. **Tab. 2** zeigt eine Übersicht der aktuell verfügbaren PSI-Systeme.

Derzeit verfügbar sind (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

- *Blueprint™*: Fa. Wright Medical, Memphis, TN, USA,
- *Materialise Match Point™*: Fa. DJO Global, Lewisville, TX, USA
- *Materialise Truematch™*: Fa. DePuy Synthes, West Chester, PA, USA,
- *Materialise Affinis Architec*: Mathys AG, Bettlach, Schweiz,

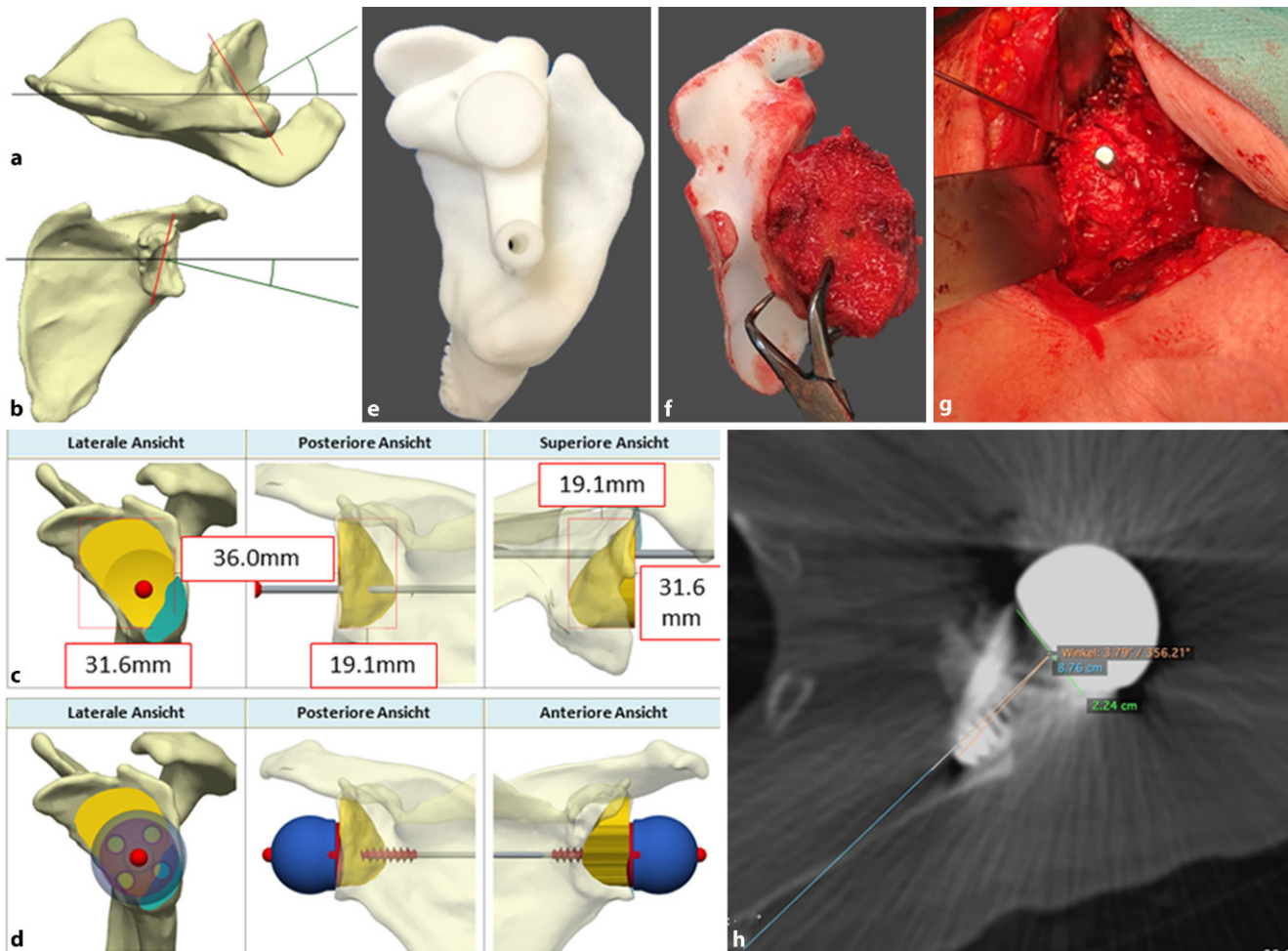


Abb. 2 ▲ Fallbeispiel einer patientenspezifischen Instrumentierung nach präoperativer Planung mit Matchpoint (Fa. DJO) bei einer pathologischen Glenoidkonfiguration mit 31° Anteversion (a) und 14° Inklination (b). Mit der präoperativen Planung werden sowohl die Form und Größe des Grafts (c) als auch die Positionierung der „base plate“ und der Schrauben simuliert (d). Mittels 3D-Druck wurden anhand dessen ein Replikat des Glenoids sowie eine Bohrschablone erstellt (e). Die Auffüllung des Glenoiddefekts erfolgte intraoperativ mit dem resezierten Humeruskopf, wobei das Graft mit Hilfe des Glenoidreplikats und der präoperativ ermittelten Größenangaben passgenau präpariert werden kann (f). Anschließend wurde das Graft über den vorgebohrten Zieldraht eingebracht. Ein zusätzlicher Kirschner-Draht dient als Antirotationschutz um Komplikationen bei der Positionierung des „base plate“ zu vermeiden (g). Im postoperativen CT zeigt sich eine sehr gute Lage der zentralen Schraube mit einer minimalen Achsdeviation von 3,8° sowie eine vollständige Auffüllung der glenoidalen Defektzone durch das Graft (h)

- Materialise TrueSight: Fa. Stryker, Kalamazoo, MI, USA,
- Zimmer® PSI System: Fa. Zimmer Biomet, Warsaw, IN, USA,
- Virtual Implant Positioning™ (VIP): Fa. Arthrex, Naples, FL, USA.

Grundsätzlich erfolgt die Planung und Umsetzung bei allen zur Verfügung stehenden Methoden ähnlich, weshalb im Weiteren auf die Planung mit Materialise (Materialise GmbH) als Anbieter für verschiedene Firmen näher eingegangen werden soll. Dennoch wollen wir es nicht versäumen einige Unterschiede aufzu-

arbeiten, die Einfluss auf die Entscheidungsfindung nehmen könnten.

Humorale vs. glenoidale Planung

In Ergänzung zur grundlegenden Planung der glenoidalen Komponente bietet das Blueprint-System einerseits die zusätzliche Planung humeralseitig sowie die ergänzende Analyse und Simulation der glenohumeralen Bewegung postoperativ. Dies kann theoretisch insbesondere zur Abschätzung und Vermeidung eines skapulären Notchings sowie eines frühen akromialen Impingements hilfreich sein.

Einschränkend sei erwähnt, dass es hierzu bis dato keine validen Prüfungen hinsichtlich der diesbezüglichen Genauigkeit gibt.

Intra- vs. extraartikulärer Schablone

Die CT-Planung erfasst naturgemäß die präoperative knöcherne Ausgangssituation. Die Auflage einer Bohrschablone auf Labrumresten, verbliebenem Gelenknorpel oder abgetragenen osteophytären Anbauten kann zu einer relevanten Abweichung der Bohrung im Vergleich

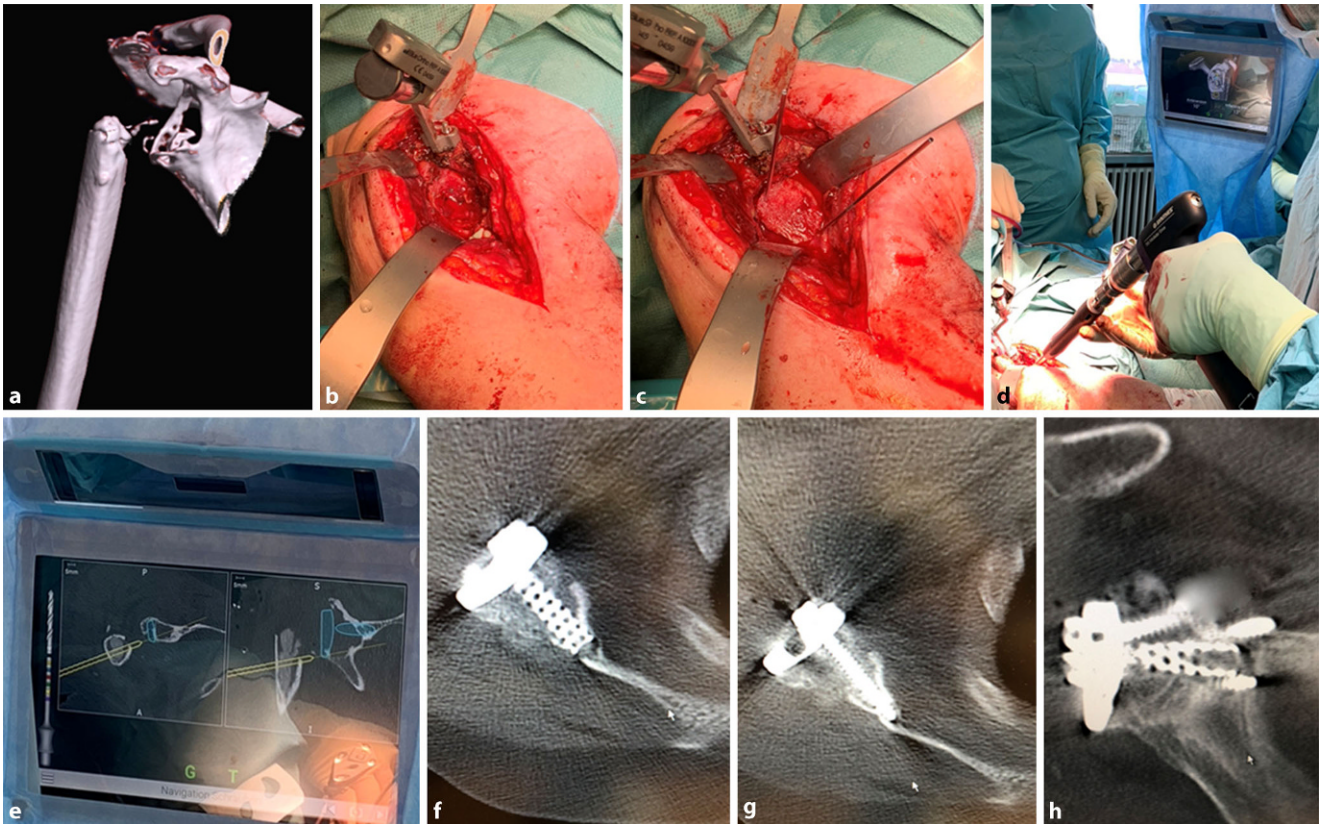


Abb. 3 ▲ Nach Ausbau einer gelockerten anatomischen Schultertotalendoprothese besteht dieser ausgeprägte knöcherne Defekt des Glenoids mit partiell erhaltenem, posterioren Pfannenrand. Bei Destruktion der Referenzierungsmöglichkeiten ist in diesem Fall die Erstellung einer Schablone im Rahmen einer PSI nicht möglich (a). Daher erfolgte die intraoperative Navigation nach präoperativer Planung mit Equinoxe (Fa. Exactech). Zunächst wird ein Allograft in den Glenoiddefekt eingebracht und mit Kirschner-Drähten fixiert (c). Anschließend erfolgt das navigierte Einbringen der „base plate“ (d,e). Dies erfolgt Anhand der präoperativen CT-Bildgebung und der intraoperativ markierten knöchernen Landmarken. Im postoperativen CT zeigt sich eine optimale Lage des zentralen Zapfens und der peripheren Schrauben sowie eine vollständige Auffüllung der glenoidalen Defektzone durch das Graft (f, g, h)

zur präoperativen Planung führen. Daher birgt die intraartikuläre Abstützung technische Risiken, die beachtet und umgesetzt werden müssen.

Die extraartikuläre Positionierung erfolgt durch eine Referenzierung der Schablone an der Korakoidbasis oder am vorderen Skapulahals. Hierfür ist die sorgfältige Präparation und Darstellung bzw. die Existenz der extraartikulären Strukturen notwendig (■ **Abb. 3**). Über die zentrale Bohrdrahtführung wird die extra- und intraartikuläre Referenzierung kombiniert. Dadurch sollen mögliche Fehler bei der Präparation der Glenoidoberfläche oder des Pfannenrands kompensiert werden, um die Technik konstanter, sicherer und zuverlässiger zu gestalten.

Instrumentierung des Zieldrahts vs. Instrumentierung der Präparation und Implantation

Die operative Glenoidimplantation – unabhängig ob anatomisch oder invers – ist maßgeblich definiert über die Platzierung eines Zieldrahts, über den im weiteren Verlauf die gesamte Instrumentierung sowie das Reaming etc. erfolgt. Dies erfolgt in der Mehrzahl der verfügbaren Systeme mithilfe der Standardinstrumentarien. Einige Implantatsysteme wie z. B. Zimmer PSI stellen spezielle Instrumente zur Verfügung, die zusätzlich zur Kirschner-Draht-Platzierung auch die Fräsung und Implantation patientenspezifisch ermöglichen, um hier mögliche Abweichungen von der ursprünglichen Planung zu minimieren.

Bohrschablone als 3D-Druck vs. mehrfach verwendbarer Kalibrator

Als Alternative zum 3D-Druck stellt Arthrex mit dem VIP-System einen 5D-Kalibrator zur Verfügung. Der 5D-Kalibrator erlaubt es dem Anwender, unterschiedliche mit A bis E bezeichnete Regler in unterschiedliche Höhen von 0–65 mm auf der Glenoidoberfläche zu platzieren, um so den Eintrittspunkt für den zentralen Bohrdraht zu definieren. Hierdurch entfällt die Erstellung und Zusendung des 3D-Druckes. Lediglich ein Kode aus Buchstaben (A bis E) mit jeweiliger Ziffer, die die Höhe des Reglers definiert, wird benötigt und übermittelt.

Technische Durchführung (Materialise Matchpoint, DJO)

Als Basisdatensatz wird ein CT-Scan mit einer möglichst geringen Schnittdicke (maximal 1 mm) der gesamten Skapula durchgeführt. Dieser Datensatz wird nun in die online-basierte Planungssoftware geladen. Zum Teil automatisiert bzw. durch die Industriepartner werden die Reliabilität der knöchernen Strukturen evaluiert und somit die Parameter der Skapulageometrie (Skapulafläche, neutrale Inklinationsachse, Glenoidfläche) bestimmt. Dieser Prozess kann in Abhängigkeit von der zugrunde liegenden Qualität des Datensatzes und der Veränderung der Skapulamorphologie 2 bis 3 Tage dauern. Anschließend wird die virtuelle Planung anhand der kommerziellen Software durchgeführt. Hierbei wird mittels der Software der zentrale Bohrdraht positioniert und dieser gibt folglich die Richtung der Glenoidpräparation sowie die Positionierung der Glenoidkomponente oder -basisplatte im 3D-Raum wieder. Darüber hinaus können im Rahmen dessen Größe der Basisplatte und Länge der zentralen sowie peripheren Schrauben simuliert werden. Allerdings kann die Tiefe der Glenoidpräparation (Medialisierung) nicht in die PSI-Schablone transferiert werden. Dies ist der Vorteil bei der „Live-Navigation“ der Fa. Exactech (ExactechGPS® Shoulder Application, Fa. Exactech, Gainesville, FL, USA).

Bei relevantem knöchernem Substanzdefekt wird die Notwendigkeit einer Korrekturfräsung sowie metallischer oder knöcherner Augmentierung geprüft und geplant. Mittels der Software können hierbei die exakten Maße des benötigten Grafts bestimmt werden. **Abb. 1 und 2** zeigen beispielhaft Fälle von PSI bei relevanten knöchernen Substanzdefekten. Ob die alte Glenoidkonfiguration angestrebt wird oder nur eine teilweise Korrektur erfolgen kann, muss individuell je nach Glenoiddefekt entschieden werden. Bei der idealen Glenoidrekonstruktion wird die native Knochensubstanz weitestgehend erhalten, die Retroversion auf die ursprüngliche Glenoidretroversion des Patienten korrigiert und die größtmög-

liche Kontaktfläche zwischen Implantat und Knochenoberfläche geschaffen [20].

Nach Abschluss der Planung wird das geplante Zielinstrumentarium (PSI) sowie als Referenz eine Schablone des Glenoids mit einem 3D-Drucker hergestellt und versandt. Dieser Prozess nimmt im Regelfall etwa 2 bis 3 Wochen in Anspruch.

Einschränkungen

Zur Herstellung der Planung müssen die CT-Daten des Patienten online hochgeladen werden und verlassen je nach Hersteller dabei auch den EU-Raum. Diesbezüglich müssen die gesetzlichen Datenschutzrichtlinien überprüft und eingehalten werden.

- Einige Hersteller sammeln die eingegangenen Daten und werten diese aus. Es wird dabei nicht grundsätzlich das Einverständnis des Patienten und/oder des Behandlers eingeholt. Natürlich sind die CT-Daten in aller Regel anonymisiert, aber auch das Hochladen der anonymisierten Daten ohne Zuordnung zu einem Patientennamen gelingt nicht in allen Fällen. Hier kollidieren möglicherweise die Interessen der Industrie mit den Vorstellungen der Ärzte bzw. kommt es zur Verletzung der Datenschutzrichtlinien.
- Bei einliegenden Endprothesen kann durch die Artefaktenstehung der einliegenden Komponenten eine präoperative Planung unmöglich sein. Weiterhin wird ein möglicher knöcherner Substanzverlust bei Explantation nicht berücksichtigt. Im Fall der Revisionsendoprothetik ist daher ein zweizeitiges Vorgehen mit primärem Ausbau, CT-Diagnostik, Planung und endprothetischem Wiederaufbau indiziert.
- Ausgeprägte knöcherner Substanz- bzw. Defektsituationen mit Kompromittierung oder Verlust der Referenzpunkte können u. U. nicht sinnvoll und valide in eine Schablone, sodass eine PSI nicht möglich ist (**Abb. 3**).
- Die Weichteilsituation und mögliche damit einhergehende Probleme

werden in der Planung nicht berücksichtigt.

Fazit für die Praxis

- Die patientenspezifische Instrumentierung (PSI) stellt ein vielversprechendes Tool dar, um eine genauere Platzierung der Glenoidkomponente zu ermöglichen und dies reproduzierbarer zu machen.
- Bei komplexen Glenoiddefekten resultiert der Einsatz von PSI in einer signifikant besseren Positionierung der Glenoidkomponente.
- Bei der anatomischen Schultertotalendoprothetik erscheint der regelhafte Einsatz von PSI sinnvoll, da hier die exakte Positionierung der Glenoidkomponente einen relevanten Einfluss auf die Standzeit der Prothese hat.
- Von dreidimensionaler (3D-)Planung und PSI profitieren Operateure mit geringer Fallzahl am meisten, da deren Genauigkeit der Glenoidpositionierung hierdurch deutlich verbessert werden kann.
- Auf dem Markt stehen zahlreiche PSI-Systeme unterschiedlicher kommerzieller Anbieter zur Verfügung.
- Ob der Einsatz von PSI einen Einfluss auf das funktionelle Ergebnis oder die Standzeit der implantierten Prothese hat ist bisher nicht wissenschaftlich belegt.

Korrespondenzadresse



Dr. J. Schmalz
Abteilung für Unfall- und Handchirurgie, St. Vincentius Klinik, ViDia Kliniken
Suedendstraße 32,
76137 Karlsruhe, Deutschland
jonas.schmalz@vincentius-ka.de

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. C. Gerhardt und L.J. Lehmann sind Berater für die Firmen Arthrex und DJO. J. Schmalz gibt an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

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.

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

- Berhouet J, Gulotta LV, Dines DM et al (2017) Preoperative planning for accurate glenoid component positioning in reverse shoulder arthroplasty. *Orthop Traumatol Surg Res* 103:407–413. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2016.12.019>
- Cabarcas BC, Cvetanovich GL, Gowd AK et al (2019) Accuracy of patient-specific instrumentation in shoulder arthroplasty: a systematic review and meta-analysis. *JSES Open Access* 3:117–129. <https://doi.org/10.1016/j.jses.2019.07.002>
- Dallalana R, McMahon R, East B, Geraghty L (2016) Accuracy of patient-specific instrumentation in anatomic and reverse total shoulder arthroplasty. *Int J Shoulder Surg* 10:59–66. <https://doi.org/10.4103/0973-6042.180717>
- Eraly K, Stoffelen D, Vander Sloten J et al (2016) A patient-specific guide for optimizing custom-made glenoid implantation in cases of severe glenoid defects: an in-vitro study. *J Shoulder Elbow Surg* 25:837–845. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2015.09.034>
- Farron A, Terrier A, Büchler P (2006) Risks of loosening of a prosthetic glenoid implanted in retroversion. *J Shoulder Elbow Surg* 15:521–526
- Gauci MO, Boileau P, Baba M et al (2016) Patient-specific glenoid guides provide accuracy and reproducibility in total shoulder arthroplasty. *Bone Joint J* 98:1080–1085. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.98B8.37257>
- Gutiérrez S, Walker M, Willis M et al (2011) Effects of tilt and glenosphere eccentricity on baseplate/bone interface forces in a computational model, validated by a mechanical model, of reverse shoulder arthroplasty. *J Shoulder Elbow Surg* 20:732–739. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2010.10.035>
- Hendel MD, Bryan JA, Barsoum WK et al (2012) Comparison of patient-specific instruments with standard surgical instruments in determining glenoid component position: a randomized prospective clinical trial. *J Bone Joint Surg Am* 94:2167–2175. <https://doi.org/10.2106/JBJS.K.01209>
- Heylen S, Van Haver A, Vuylsteke K et al (2016) Patient-specific instrument guidance of glenoid component implantation reduces inclination variability in total and reverse shoulder arthroplasty. *J Shoulder Elbow Surg* 25:186–192. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2015.07.024>
- Ho JC, Sabesan VJ, Iannotti JP (2013) Glenoid component retroversion is associated with osteolysis. *J Bone Joint Surg Am* 95:e82. <https://doi.org/10.2106/JBJS.L.00336>
- Iannotti J, Baker J, Rodriguez E et al (2014) Three-dimensional preoperative planning software and a novel information transfer technology improve glenoid component positioning. *J Bone Joint Surg Am* 96:e71. <https://doi.org/10.2106/JBJS.L.01346>
- Iannotti JP, Walker K, Rodriguez E et al (2017) Three-dimensional preoperative planning and patients specific instrumentation improve glenoid component positioning. *J Shoulder Elbow Surg* 26:e321–e323. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2017.06.011>
- Iannotti JP, Weiner S, Rodriguez E et al (2015) Three-dimensional imaging and templating improve glenoid implant positioning. *J Bone Joint Surg Am* 97:651–658. <https://doi.org/10.2106/JBJS.N.00493>
- Levy JC, Everding NG, Frankle MA, Keppler LJ (2014) Accuracy of patient-specific guided glenoid baseplate positioning for reverse shoulder arthroplasty. *J Shoulder Elbow Surg* 23:1563–1567. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2014.01.051>
- Lewis GS, Stevens NM, Armstrong AD (2015) Testing of a novel pin array guide for accurate three-dimensional glenoid component positioning. *J Shoulder Elbow Surg* 24:1939–1947. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2015.06.022>
- Nyffeler RW, Sheikh R, Atkinson TS et al (2006) Effects of glenoid component version on humeral head displacement and joint reaction forces: an experimental study. *J Shoulder Elbow Surg* 15:625–629
- Rodríguez JA, Entezari V, Iannotti JP, Ricchetti ET (2019) Pre-operative planning for reverse shoulder replacement: the surgical benefits and their clinical translation. *Ann Jt* 4:4–4. <https://doi.org/10.21037/ajj.2018.12.09>
- Throckmorton TW, Gulotta LV, Bonnarens FO et al (2015) Patient-specific targeting guides compared with traditional instrumentation for glenoid component placement in shoulder arthroplasty: a multi-surgeon study in 70 arthritic cadaver specimens. *J Shoulder Elbow Surg* 24:965–971. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2014.10.013>
- Walch G, Vezeridis PS, Boileau P et al (2015) Three-dimensional planning and use of patient-specific guides improve glenoid component position: an in-vitro study. *J Shoulder Elbow Surg* 24:302–309. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2014.05.029>
- Yongpravat C, Lester JD, Saifi C et al (2013) Glenoid morphology after reaming in computer-simulated total shoulder arthroplasty. *J Shoulder Elbow Surg* 22:122–128. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2011.12.010>