

Lill
Scheibel · Voigt



Die proximale Humerusfraktur

Die proximale Humerusfraktur

Helmut Lill
Markus Scheibel
Christine Voigt
(Hrsg.)

Die proximale Humerusfraktur

Mit 497 Abbildungen

Herausgeber

Prof. Dr. med. Helmut Lill

Diakoniekrankenhaus Friederikenstift gGmbH
Klinik für Unfall- und Wiederherstellungschirurgie
Humboldtstraße 5
30196 Hannover

PD Dr. med. Christine Voigt

Diakoniekrankenhaus Friederikenstift gGmbH
Klinik für Unfall- und Wiederherstellungschirurgie
Humboldtstraße 5
30196 Hannover

Univ.-Prof. Dr. med. Markus Scheibel

Charité – Universitätsmedizin Berlin
Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie (CMSC)
Augustenburger Platz 1
13353 Berlin

ISBN 978-3-642-35256-0 ISBN 978-3-642-35257-7 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-35257-7

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Medizin

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Produkthaftung: Für Angaben über Dosierungsanweisungen und Applikationsformen kann vom Verlag keine Gewähr übernommen werden. Derartige Angaben müssen vom jeweiligen Anwender im Einzelfall anhand anderer Literaturstellen auf ihre Richtigkeit überprüft werden.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Planung: Antje Lenzen, Heidelberg

Projektmanagement: Barbara Knüchel, Heidelberg

Lektorat: Dr. Doortje Cramer-Scharnagl, Edewecht

Projektkoordination: Michael Barton, Heidelberg

Zeichnerin: Birgit Brühmüller, Waghäusel

Umschlaggestaltung: deblik Berlin

Herstellung: le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Medizin ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer.com

Vorwort: Die Proximale Humerusfraktur – ein Abenteuer!

Wir, Helmut Lill, Markus Scheibel und Christine Voigt, haben uns diesem Abenteuer gestellt. Noch sind viele Fragen offen, viele Kontroversen werden diskutiert:

- Welche Frakturen sollen bei wem wie behandelt werden?
- Gibt es überhaupt Therapiestandards?
- Können experimentelle Untersuchungen einen wichtigen Beitrag leisten?
- Welche Innovationen gibt es, und wie sind sie zu bewerten?

Zusammen mit unseren Mitarbeitern und Freunden, die sich seit Jahren diesem Thema widmen, war es uns ein Bedürfnis, die aktuellen Aspekte und Entwicklungen zusammenzutragen. Herausgekommen ist ein Buch auf höchstem klinischem und wissenschaftlichem Niveau, welches wir mit Freude allen Interessierten präsentieren möchten.

Das Buch spricht vom interessierten Patienten bis hin zum Schulter spezialisten alle an und dient dem behandelnden Arzt als Nachschlagewerk in Alltagsfragen.

Wir danken dem Springer-Verlag für die Annahme des Themas und die professionelle Unterstützung sowie unseren Freunden und Autorenteam für die aktive Mitgestaltung dieses Buches und den jahrelangen kollegialen Austausch.

Viel Spaß beim Abenteuer „proximale Humerusfraktur“!

Helmut Lill
Markus Scheibel
Christine Voigt



■ Prof. Dr. med. Helmut Lill



■ Univ.-Prof. Dr. med. Markus Scheibel



■ PD Dr. med. Christine Voigt

Dank

Wir danken der Klinik für Diagnostische und Interventionelle Radiologie, Chefärztin Frau Dr. med. Bergit Boy, für die Überlassung der Kopierrechte an Röntgen- und CT-Bildern des Diakoniekrankenhauses Friederikenstift gGmbH, Hannover, sowie dem Kinder- und Jugend-Krankenhaus AUF DER BULT, Hannover, Klinik für Kinderchirurgie/Kinderurologie, Chefärztin Frau Privatdozentin Dr. med. Barbara Ludwikowski, für die Überlassung der Kopierrechte an Röntgenbildern aus [Kap. 4](#).

Des Weiteren danken wir der überörtlichen Radiologischen Gemeinschaftspraxis am Marstall, Standort Friederikenstift, Herrn Dr. Bernd Dietrich und Herrn Dr. Florian Elgeti, für die Überlassung der Kopierrechte an den MRT-Bildern.

Inhaltsverzeichnis

1	Frakturbiologie und -morphologie	1
	<i>M. Tauber, H. Resch</i>	
1.1	Frakturbiologie	2
1.1.1	Blutversorgung des Humeruskopfes	2
1.1.2	Humorale Faktoren	4
1.1.3	Periost	5
1.1.4	Knochendichte	5
1.1.5	Prognostische Kriterien	7
1.2	Frakturmorphologie	8
1.2.1	Klassifikationssysteme	9
1.2.2	Wertigkeit und Reproduzierbarkeit aktueller Klassifikationssysteme	14
	Literatur	16
2	Prä-/intra- und postoperative Diagnostik	19
	<i>A. Ellwein, H. Lill, C. Voigt</i>	
2.1	Präoperative Diagnostik	20
2.1.1	Klinische Untersuchung	20
2.1.2	Konventionelles Röntgen	21
2.1.3	Computertomographie (CT) mit 3-D-Rekonstruktion	22
2.1.4	Magnetresonanztomographie (MRT)	22
2.1.5	Sonographie	24
2.2	Intraoperative Diagnostik	25
2.2.1	C-Bogen	25
2.2.2	Arthroskopie	26
2.3	Postoperative Diagnostik	26
2.3.1	Postoperative radiologische Diagnostik	26
2.3.2	Osteoporosediagnostik	26
	Literatur	27
3	Konservative Therapie: Wer und wie?	29
	<i>J. Wolke, M. Scheibel</i>	
3.1	Indikationen zur konservativen Therapie	30
3.2	Kontraindikationen zur konservativen Therapie	31
3.3	Technik der konservativen Therapie	31
3.3.1	Allgemeines Nachbehandlungsschema	32
3.3.2	Immobilisation bei unterschiedlichen Frakturformen	33
3.3.3	Klinische und radiologische Nachkontrollen	33
3.4	Klinische und radiologische Ergebnisse nach konservativer Frakturbehandlung	34
3.5	Fazit	36
	Literatur	36
4	Proximale Humerusfrakturen bei Kindern und Jugendlichen	37
	<i>C. Voigt, H. Lill</i>	
4.1	Inzidenz	38
4.2	Frakturtypen	38
4.3	Korrekturpotenzial	38
4.4	Konservative Therapie	38
4.5	Operative Therapie, Reposition in Narkose	38
4.5.1	Geschlossene Reposition in Narkose	38

4.5.2	Operationsverfahren	40
4.5.3	Offene Reposition	41
4.6	Mögliche Komplikationen	42
	Literatur	42
5	Osteosynthesen: Wann und wie?	45
	<i>M. Werth, M. Scheibel, C. Katthagen, C. Voigt, H. Lill, G. Jensen,</i>	
	<i>A. Auffarth, A. Hartmann, H. Resch, A. Ellwein</i>	
5.1	Häufigkeit und Relevanz aktueller Osteosyntheseverfahren	46
5.2	Biomechanische Grundlagen	46
5.2.1	Knochenmineraldichte und Knochenstruktur des proximalen Humerus	46
5.2.2	Biomechanik am proximalen Humerus	47
5.2.3	Biomechanische Implantattestungen – Implantateigenschaften	48
5.2.4	Biomechanik der Plattenosteosynthese	49
5.2.5	Biomechanik der Nagelosteosynthese	50
5.2.6	Varusdeformität und medialer Support	51
5.3	Operative Techniken	53
5.3.1	Plattenosteosynthese	53
5.3.2	Nagelosteosynthese	70
5.3.3	Gedeckte Reposition, perkutane winkelstabile Bohrdrahtosteosynthese und Schraubenosteosynthese ..	83
5.4	Grenzen Osteosynthese – Prothese	90
5.4.1	Fehlende mediale Abstützung und metaphysäre Trümmerzone	90
5.4.2	Osteoporose	92
5.4.3	Head-Split-Frakturen	94
5.4.4	Luxationsfrakturen	95
5.4.5	Perfusion – avaskuläre Humerkopfnekrosen	96
5.4.6	Schlussfolgerung: Osteosynthese vs. Prothese	97
	Literatur	99
6	Besonderheiten	105
	<i>J. Imrecke, C. Voigt, H. Lill, C. Gerhardt, M. Scheibel</i>	
6.1	Luxationsfrakturen	106
6.1.1	Ventrale Luxationsfrakturen	106
6.1.2	Dorsale Luxationsfrakturen	111
6.2	Head-Split- bzw. Multipartfrakturen	114
6.2.1	Head-Split-Frakturen	114
6.2.2	Multipartfrakturen	115
6.3	Kombinations- bzw. Begleitverletzungen	115
6.3.1	Glenoidfrakturen	115
6.3.2	Rotatorenmanschettenläsionen	120
6.3.3	Bizepssehnenverletzungen	122
6.3.4	Plexusläsionen	123
6.3.5	Gefäßverletzungen	123
6.4	Pathologische Frakturen am proximalen Humerus	124
6.4.1	Tumordiagnostik	124
6.4.2	Tumor-like Lesions: Juvenile (solitäre) und aneurysmatische Knochenzysten	125
6.4.3	Benigne Knochentumoren	126
6.4.4	Maligne Knochentumoren	127
6.4.5	Frakturen bei Metastasen	127
6.4.6	Frakturen bei Osteoporose	129
	Literatur	130

7	Primäre Prothetik: Wann und welche?	133
	<i>U. Brunner</i>	
7.1	Indikation zur Operation: Primat der Rekonstruktion gegenüber der Prothese	134
7.2	Grenzen der Rekonstruktion: Indikation zur Prothese	135
7.2.1	Untersuchung, allgemeine und spezifische Risikofaktoren	136
7.2.2	Indikation zur Frakturprothese	137
7.2.3	Zeitpunkt und Operateur	140
7.2.4	Hemi- oder Totalprothese?	140
7.3	Anatomisch oder invers?	141
7.3.1	Ergebnisse nach anatomischer Frakturprothese	141
7.3.2	Ergebnisse nach inverser Frakturprothese	144
7.4	Technik der anatomischen Frakturhemiprothese	147
7.5	Technik der inversen Frakturprothese	149
	Literatur	152
8	Posttraumatische Zustände	157
	<i>J. Imrecke, C. Voigt, H. Lill, P. Habermeyer, P. Magosch</i>	
8.1	Korrekturosteosynthese/-osteotomie, Pseudarthrose, Arthrodese	158
8.1.1	Korrekturosteosynthese/-osteotomie	158
8.1.2	Pseudarthrosen	161
8.1.3	Arthrodese	165
8.2	Sekundäre Frakturprothetik	167
8.2.1	Pathomorphologie und Klassifikation der chronischen Humeruskopffraktur	167
8.2.2	Diagnostik und präoperative Röntgenplanung	170
8.2.3	Implantatwahl	172
8.2.4	Kontraindikationen zur sekundären Frakturprothesenimplantation	172
8.2.5	Intrakapsuläre chronische Fraktur Typ 1 nach Boileau	172
8.2.6	Intrakapsuläre chronische Fraktur Typ 2 nach Boileau	173
8.2.7	Extrakapsuläre chronische Fraktur Typ 3 nach Boileau: subkapitale Pseudarthrose	177
8.2.8	Extrakapsuläre chronische Fraktur Typ 4 nach Boileau: chronisch dislozierte Humeruskopffraktur mit ausgeprägter Fehlstellung des Tuberculum majus	177
8.2.9	OP-Technik der sekundären Frakturprothetik	178
8.2.10	Verfahrenswechsel nach sekundärer anatomischer Frakturprothese	186
8.2.11	Ergebnisse nach anatomischer sekundärer Frakturprothese	186
8.2.12	Komplikationen der anatomischen sekundären Frakturprothetik	188
8.2.13	Ergebnisse der inversen sekundären Frakturprothetik	188
	Literatur	189
9	Infektionen	191
	<i>G. Jensen, H. Lill, C. Voigt</i>	
9.1	Häufigkeit, Ursachen und Erreger	192
9.2	Klassifikation	192
9.3	Diagnostik	193
9.3.1	Bildgebende Verfahren	193
9.3.2	Labor	193
9.3.3	Mikrobiologie	193
9.3.4	Histopathologische Infektdiagnostik	194
9.4	Die infizierte Osteosynthese	195
9.4.1	Der Frühinfekt	195
9.4.2	Der Spätinfekt	196
9.5	Die infizierte Endoprothese	197
9.5.1	Der Frühinfekt	197

9.5.2	Der Spätinfekt	197
9.6	Rückzugsmöglichkeiten: Resektionsarthroplastik, Fistula persistens und Schulterarthrodese	200
	Literatur	202
10	Trends und Entwicklungen	205
	<i>S. Pauly, M. Scheibel, C. Katthagen, C. Voigt, H. Lill</i>	
10.1	Arthroskopische Versorgung von Tuberculum-majus- und -minus-Frakturen	206
10.1.1	Ätiologie und Pathogenese	206
10.1.2	Diagnostik	206
10.1.3	Indikationen	206
10.1.4	Tuberculum-majus-Frakturen	207
10.1.5	Tuberculum-minus-Frakturen	209
10.1.6	Kombinierte Tuberculum-majus- und -minus-Frakturen	209
10.1.7	Technik der arthroskopisch (unterstützten) Versorgung	210
10.1.8	Limitierungen der arthroskopischen Technik	212
10.1.9	Nachbehandlung	214
10.1.10	Fazit	214
10.2	Arthroskopische Nagelosteosynthese	214
10.2.1	Technik der arthroskopischen Nagelosteosynthese	215
10.2.2	Ergebnisse nach arthroskopischer Nagelosteosynthese	217
10.3	Arthroskopische Materialentfernung	218
10.3.1	Indikationen zur Arthroskopie nach Osteosynthese am proximalen Humerus	218
10.3.2	Technik der arthroskopischen Plattenentfernung und Kapsulotomie	221
10.3.3	Ergebnisse und Nachbehandlung nach arthroskopischer Plattenentfernung und Arthrolyse	223
10.3.4	Weitere Möglichkeiten der arthroskopischen Materialentfernung nach operativ behandelter proximaler Humerusfraktur	224
	Literatur	226
	Serviceteil	229
	Stichwortverzeichnis	230

Autorenverzeichnis

Herausgeber

Prof. Dr. med. Helmut Lill

Diakoniekrankenhaus Friederikenstift gGmbH
Humboldtstraße 5
D-30196 Hannover

Univ.-Prof. Dr. med. Markus Scheibel

Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie (CMSC)
Charité – Universitätsmedizin Berlin
Augustenburger Platz 1
D-13353 Berlin

PD Dr. med. Christine Voigt

Diakoniekrankenhaus Friederikenstift gGmbH
Humboldtstraße 5
D-30196 Hannover

Autorenteams

Prof. Dr. med. Ulrich H. Brunner

Krankenhaus Agatharied GmbH
Norbert-Kerkel-Platz 1
D-83734 Hausham

Prof. Dr. med. Peter Habermeyer

Dr. med. Petra Magosch
ATOS Klinik München
Zentrum für Schulter- und Ellenbogenchirurgie
Effnerstraße 38
D-81925 München

ATOS Klinik Heidelberg

Bismarckstraße 9–15
D-69115 Heidelberg

Prof. Dr. med. Helmut Lill /

PD Dr. med. Christine Voigt

Dr. med. Alexander Ellwein

Dr. med. Julia Imrecke

Dr. med. Gunnar Jensen

Dr. med. Christoph Katthagen

Diakoniekrankenhaus Friederikenstift gGmbH
Humboldtstraße 5
D-30196 Hannover

Univ.-Prof. Dr. med. Herbert Resch

PD Dr. med. Alexander Auffarth

Dr. med. Andreas Hartmann

PD Dr. med. Mark Tauber

(ATOS Klinik München, s. o.)

Paracelsus Medizinische Universität Salzburg
Müllner-Hauptstraße 48
A-5020 Salzburg

Univ.-Prof. Dr. med. Markus Scheibel

Dr. med. Christian Gerhardt

Dr. med. Stephan Pauly

Magdalena Werth

Dr. med. Julia Wolke

Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie (CMSC)
Charité – Universitätsmedizin Berlin
Augustenburger Platz 1
D-13353 Berlin

Frakturbiologie und -morphologie

M. Tauber, H. Resch

1.1	Frakturbiologie – 2
1.1.1	Blutversorgung des Humeruskopfes – 2
1.1.2	Humorale Faktoren – 4
1.1.3	Periost – 5
1.1.4	Knochendichte – 5
1.1.5	Prognostische Kriterien – 7
1.2	Frakturmorphologie – 8
1.2.1	Klassifikationssysteme – 9
1.2.2	Wertigkeit und Reproduzierbarkeit aktueller Klassifikationssysteme – 14
	Literatur – 16

1.1 Frakturbiologie

Im Rahmen der Frakturheilung nehmen in erster Linie biologische Faktoren eine zentrale Rolle ein. Dies gilt sowohl für die konservative als auch für die operative Frakturbehandlung. Bei der operativen Versorgung gewinnen zusätzlich mechanische und implantatspezifische Faktoren an Bedeutung. Aus biologischer Sicht ist die Vaskularität prioritär zu betrachten. Knochenbruchheilung setzt eine suffiziente Durchblutung der Fragmente voraus. Demineralisierung mit Remodeling von kortikalem und spongiossem Knochengewebe, fibroblastische Organisation des Frakturhämatoms, Kallusformation und Neoangiogenese sind biologische Prozesse im Rahmen der Frakturkonsolidierung, bei denen eine intakte Vaskularisation Grundvoraussetzung ist. Daher ist eine gewisse Kenntnis der Humeruskopfdurchblutung essenziell, um das Risiko einer posttraumatischen avaskulären Kopfnekrose besser einschätzen zu können sowie relevante Strukturen im Rahmen einer kopferhaltenden operativen Versorgung zu schonen und zu wahren.

Ein weiterer wichtiger biologischer Faktor ist das Periost. Zum einen wird durch periostale Blutgefäße die Vaskularität bzw. Vaskularisation der Fragmente sichergestellt, zum anderen stellen periostale interfragmentäre Verbindungen Repositionshilfen bei der operativen Frakturbehandlung, hier insbesondere bei minimalinvasiven perkutanen Verfahren, dar.

Die Tatsache, dass die Lebenserwartung der Bevölkerung in den letzten Jahrzehnten stetig gestiegen ist und dieser Trend auch für die nächsten Jahre anhalten wird, führt zu einer steigenden Inzidenz an Humeruskopffrakturen. Epidemiologische Daten zeigen, dass zwischen 1970 und 2002 bereits eine Verdreifachung der proximalen Humerusfrakturen unter der finnischen Bevölkerung stattgefunden hat – mit Zunahme der Inzidenz von 32/100.000 auf 105/100.000 (Palvanen et al. 2006).

Dabei ist das Durchschnittsalter von 73 auf 78 Jahre angestiegen. Interessanterweise hat sich die Geschlechterverteilung Frauen/Männer zuungunsten der männlichen Bevölkerung von 3,6/1 (1970) auf 2,6/1 (2002) verschoben. Kannus et al. (2009) haben allerdings auch aufgezeigt, dass die Inzidenz proximaler Humerusfrakturen bei Frauen über 80 Jahren im Zeitraum von 1970–1995 von 88/100.000 auf 304/100.000 drastisch angestiegen ist, sich allerdings dieser Wert im Jahr 2007 bei 298/100.000 stabilisiert hatte. Damit steht auch fest, dass das primäre Patientenkollektiv in der Behandlung von Humeruskopffrakturen ältere Frauen darstellen, so dass das Thema der Osteoporose als weiterer biologischer Faktor an Bedeutung gewinnt. Durch die systemische Rarefizierung der trabekulären spongiösen Knochenstruktur mit Reduktion der Knochendichte entstehen erhebliche Herausforderungen

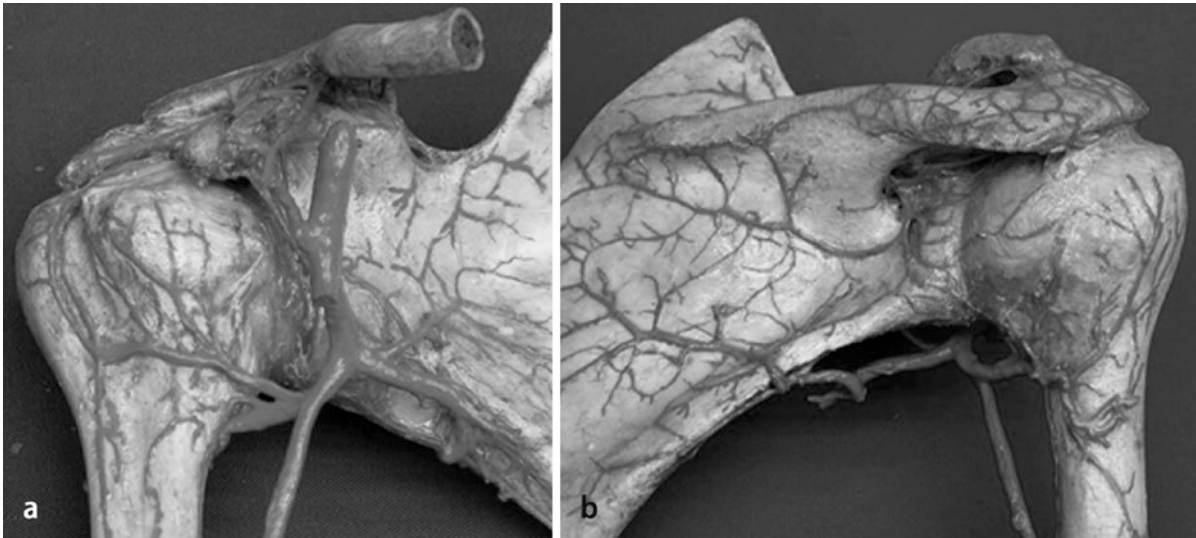
an die osteosynthetischen Implantate mit teilweise hohen Komplikations- und Versagensraten.

1.1.1 Blutversorgung des Humeruskopfes

Anatomische Studien haben schon früh gezeigt, dass für die Durchblutung des Humeruskopfes in erster Linie die beiden Arteriae (Aa.) circumflexae humeri verantwortlich sind. (Abb. 1.1) Lange Zeit ging man davon aus, dass dabei der Arteria (A.) circumflexa anterior humeri die größere Bedeutung zukomme. Diese Meinung begründete sich vor allem auf die Arbeiten von Laing (1956) und Gerber (1990). Laing (1956) führte Perfusionsuntersuchungen an Kadaverpräparaten durch und fand heraus, dass die Hauptversorgung des Humeruskopfes aus einem Ast der Arteria (A.) circumflexa anterior humeri erfolgt. Dieser Ast setzt sich intraossär bogenförmig nach posteromedial fort und verläuft knapp distal der ehemaligen Epiphysenfuge. Zusätzlich beschrieb er Zuflüsse aus posteromedialen Gefäßen sowie teilweise aus den beiden Tubercula. Gerber et al. (1990) beschrieben in ihrer Studie 1990 ausgedehnte extraossäre Anastomosen zwischen den beiden Aa. circumflexae humeri, der A. thoracoacromialis und der A. suprascapularis mit der Schlussfolgerung, dass die A. circumflexa anterior der letzte gemeinsame Durchblutungsweg für die Versorgung des Humeruskopfes sei und die A. arcuata als intraossäre Endstrecke allein für die Versorgung des gelenktragenden Kalottensegments verantwortlich sei. Brooks et al. (1993) konnten erstmalig diese Theorie widerlegen. Zwar wurde die Bedeutung der A. circumflexa anterior und deren Fortsetzung in die A. arcuata bestätigt, allerdings wurde aufgezeigt, dass bei Ligatur der A. circumflexa anterior am Eintrittspunkt in den Humeruskopf die Kopfdurchblutung vollständig erhalten blieb. Diese Erkenntnisse verwarfen die Bedeutung der extraossären Anastomosen und unterstrichen die Rolle der intraossären Anastomosen aus metaphysären und posteromedialen Gefäßen sowie aus Gefäßen der beiden Tubercula.

➤ **Nach Nachbildung einer 4-Segment-Fraktur war die Kopfdurchblutung in jenen Fällen erhalten, in denen sich die Frakturlinie nach distal und medial erstreckte, was die Bedeutung der posteromedialen Gefäße aus der A. circumflexa posterior unterstrich.**

Die Verteilung der versorgten Knochenareale auf die beiden Aa. circumflexae wurde von Duparc et al. (2008) näher untersucht und es zeigte sich dabei, dass der A. circumflexa posterior humeri sehr wohl eine bedeutsame Rolle zukommt. An 32 Kadaverpräparaten erfolgte nach intravasaler Injektion von latexhaltigem unterschiedlichem Farbstoff in die beiden Gefäße die Analyse der Durchblu-



■ **Abb. 1.1a,b** Dargestellt sind die beiden Aa. circumflexae an Kadaverpräparaten. **a** Die A. circumflexa anterior liegt sehr nahe am Knochen. Der anterolaterale Gefäßast zieht parallel zum Sulcus intertubercularis nach proximal **b** Die A. circumflexa posterior verläuft semizirkulär um den chirurgischen Hals. Dabei liegt sie nicht unmittelbar dem Knochen an und gibt mehrere perforierende Gefäßäste an den Kopf ab. (Aus Grechenig et al. 2008)

tungsverteilung an Transversalschnitten mit einer Schichtdicke von 5 mm. Anhand der Farbstoffverteilung wurde Rückschluss gezogen auf die Versorgungsareale von A. circumflexa anterior und posterior humeri. Der subchondral liegende Knochen wurde bei 91 % der Präparate von der A. circumflexa posterior humeri versorgt. Apex und Kalotte selbst zeigten eine etwa gleichmäßige Verteilung zwischen den beiden Gefäßen. Das Tuberculum minus war in 72 % von der A. circumflexa anterior, in 22 % von beiden und in 6 % von der A. circumflexa posterior versorgt. Das Tuberculum majus zeigte in 60 % der Fälle eine isolierte Versorgung durch die A. circumflexa posterior und in nur 16 % aus der A. circumflexa anterior. Das Areal am Sulcus intertubercularis wurde in 91 % von der A. circumflexa anterior versorgt. Zudem konnten die Autoren zeigen, dass eine Vielzahl an anastomosierenden Gefäßen aus der A. arcuata zu Gefäßästen der beiden Hauptgefäße besteht. Eine weitere Beobachtung war, dass der Gefäßdurchmesser der A. circumflexa anterior mit durchschnittlich 0,8 mm bei allen Präparaten kleiner war als bei der A. circumflexa posterior mit durchschnittlich 2,1 mm. Aufgrund der individuellen Durchblutungsverteilung der einzelnen anatomischen Bereiche des Humeruskopfes sind definitive Aussagen über eine mögliche posttraumatische Nekrose auch bei Mehrfragmentfrakturen schwierig. Auch die individuell variable Anzahl an Anastomosen birgt ein gewisses Potenzial an Revaskularisierung des Humeruskopfes, was gerade bei jüngeren Patienten nicht unterschätzt werden darf.

Meyer et al. (2005) untersuchten die vaskuläre Versorgung des Humeruskopfes mittels der sog. Korrosionstechnik an 6 humanen Kadaverpräparaten. Dabei wird nach

Ausspülung des Blutes aus dem Gefäßsystem dieses mit Epoxidharz gefüllt und ausgehärtet. Es zeigte sich, dass der Humeruskopf primär aus der A. circumflexa anterior versorgt wird, welche aus der A. axillaris entspringt. Ein Ast entspringt Richtung Sulcus intertubercularis, verläuft lateral entlang der langen Bizepssehne zum proximalen Ende und dringt hier in das Tuberculum majus ein. In einigen Präparaten zweigten Seitenäste in das Tuberculum majus und minus ab. Das Hauptgefäß verläuft bogenförmig quer subchondral durch den gesamten Humeruskopf und man kann davon ausgehen, dass es primär für die Versorgung des Hauptanteils des Knochens verantwortlich ist. Zusätzlich besitzt die A. circumflexa posterior humeri erhebliche Bedeutung hinsichtlich der Blutversorgung des Humeruskopfes. Bei ihrem Verlauf nach dorsal um den chirurgischen Hals gibt sie mehrere ansteigende Äste ab, die an der Knorpel-Knochen-Grenze in den Kopf eintreten.

- **Frakturen des anatomischen Halses gelten als besonders nekrosegefährdet, da die A. arcuata bei diesen Frakturformen mit entsprechender Kompro-mittierung der Blutzufuhr des Kalottenfragments durchreißt.**

Die Äste der A. circumflexa posterior humeri können daher die Durchblutung aufrechterhalten, so dass bei allen Formen der Osteosynthese bzw. bei Repositionsmanövern auf die Weichteile und Gefäße an der posteromedialen Seite geachtet werden muss. Eine direkte Anastomose zwischen A. circumflexa anterior und posterior humeri konnte nicht nachgewiesen werden. Nichtsdestoweniger wurde von ei-

nigen Autoren ein breit verzweigtes Netzwerk an kleinen Gefäßen aus diesen beiden Arterien gefunden, die in den umgebenden Weichteilen sowie an der Rotatorenmanschette Anastomosen bilden (Andary u. Petersen 2002; De La Garza et al. 1992; Gerber et al. 1990; Menck et al. 1997).

► **Die beiden Tubercula erhalten mehrere Zuflüsse aus beiden Aa. circumflexae. Die Sehnenansätze der Rotatorenmanschette haben protektiven Charakter für diese Gefäße, so dass auch im Fall einer Mitbeteiligung beider Tubercula stets eine suffiziente Vaskularität der Fragmente gewährleistet ist.**

Eine weitere Beobachtung war, dass der laterale Aspekt des Tuberculum majus keine subperiostalen Gefäße führte. Dies ist wichtig für die Positionierung der proximalen Humerusplatten, so dass bei dieser Form der Osteosynthese keine zusätzliche Kompromittierung der Kopfdurchblutung zu erwarten ist. Die zuführenden Blutgefäße liegen somit außerhalb des Plattenlagers, allerdings muss eine mögliche Beeinträchtigung des Periostes mit Kompression des venösen Abflusses bedacht werden, was eine entscheidende Rolle bei der Frakturheilung spielt. Diesbezüglich stellen minimalinvasive Techniken wie Kirschner-(K-)Draht- oder Schraubenosteosynthesen die schonendsten Verfahren mit dem geringsten Risiko der Durchblutungsgefährdung dar. Auch proximale Humerusnägel gefährden die Vaskularisation des Humeruskopfes nicht, nachdem durch den Eintritt durch die Rotatorenmanschette die A. arcuata unverletzt bleibt und ein dichtes intraossäres Kapillarnetz die Versorgung trotz Aufbohrung aufrechterhält.

In einer rezenten Arbeit wurde nochmals die Rolle der A. circumflexa posterior untermauert (Hettrich et al. 2010). In einer magnetresonanztomographischen Studie an 12 Kadaverschulterpaaren wurde mittels Kontrastmitteluntersuchung die Durchblutungsverteilung zwischen den beiden Aa. circumflexae analysiert. Dabei verteilte sich die Kopfdurchblutung im Durchschnitt zu 64 % auf die A. circumflexa posterior und nur zu 36 % auf die A. circumflexa anterior.

Duparc (2008) wies zusätzlich auf die Bedeutung der kapsulären Gefäße am medialen Kalkar hin. An 30 Schulterarthroskopien wurde die Ausdehnung der Kapsel am medialen Kalkar vermessen, und es zeigte sich, dass die Kapsel im Durchschnitt 12 (0–33) mm distal der Knorpel-Knochen-Grenze am medialen Kalkar inseriert.

► **Für die Praxis bedeutet dies, dass Frakturen, welche am medialen Kalkar proximal dieser Kapselinsertion auslaufen und die zuführenden Kapselgefäße einreißen, mit einem entsprechend höheren Risiko der Durchblutungsstörung des Kalottenfragments vergesellschaftet sind.**

1.1.2 Humorale Faktoren

Im Rahmen der Frakturheilung stellt die Vaskularisation eine *Conditio sine qua non*, ohne die eine Knochenbruchheilung nicht möglich wäre. Die Fraktur unterbricht die Blutzirkulation am Knochengewebe und führt somit zu akuter Ischämie mit Hypoxie des Knochens und Knochenmarks. Die Neoangiogenese und Stimulierung der umgebenden Blutzirkulation sind primäre, essenzielle Faktoren der Frakturheilung (Glowacki 1998). Während der Einblutung in den Frakturbereich werden Blutgerinnungsfaktoren freigesetzt und starten die Heilungskaskade. Angiogenetische Faktoren werden exprimiert und induzieren eine extensive Aussprossung neuer Blutgefäße, in erster Linie im sich formenden Kallus (Rhineland 1979). Als wichtigste Faktoren der Angiogenese sind FGF (Fibroblast Growth Factor), TGF- α und TGF- β (Transforming Growth Factor) sowie VEGF (Vascular Endothelial Growth Factor) zu nennen (Glowacki 1998). Neben diesen biochemischen Parametern nehmen auch biomechanische Aspekte eine wichtige Rolle im Rahmen der Frakturheilung ein. Instabilität zwischen den Fragmenten beeinträchtigt bzw. verhindert die Vaskularisierung der Region, in der sich die Kallusmineralisierung abspielt, und führt zur Entstehung von fibrokartilaginärem Gewebe im Frakturspalt (Claes et al. 2002; Claes et al. 2003). Allerdings ist auch eine gewisse mechanische Belastung auf die Frakturfragmente erforderlich, um Angio- und Osteogenese zu stimulieren, nachdem gezeigt werden konnte, dass Mikrobewegungen an der Fraktur den Blutfluss steigern (Kirchen et al. 1995; Wallace et al. 1994). Grundsätzlich stellt der Prozess der Frakturheilung eine komplexe Wechselwirkung zwischen lokalen und systemischen Regulationsmechanismen dar, in die eine Reihe von Wachstumsfaktoren, Hormonen, Zytokinen und Matrixbausteinen involviert ist (Bostrom 1998). Neben FGF, IGF-1 und IGF-2 (Insulin-like Growth Factor) und PDGF (Platelet Derived Growth Factor), nehmen insbesondere TGF- β und BMPs (Bone Morphogenetic Proteins) eine zentrale Rolle ein. TGF- β wird von Osteoblasten synthetisiert und in die extrazelluläre Matrix abgegeben. Es stimuliert die weitere Synthese von extrazellulärer Matrix und fördert die enchondrale Ossifikation (Joyce et al. 1990). BMPs spielen eine wichtige Rolle bei der Induktion von Knochengewebe im Rahmen der Chemotaxis, Mitose, Differenzierung in Knorpelgewebe und Umwandlung in Knochengewebe. Zudem regulieren sie Hämatopoese, Synthese der extrazellulären Matrix und Apoptose (Reddi 2001). Tierexperimentelle Studien konnten für BMP-2 und BMP-7 eine Induktion von Osteogenese, verbesserte Frakturheilung und Defektauffüllung nachweisen (Mizumoto et al. 2003; Sciadini et al. 2000; Yudell u. Block 2000). Die Rolle des Alters für den Heilungsprozess im Rahmen von Knochenfrakturen ist

nicht ganz geklärt. Zum einen ist die Angiogenese beim älteren Patienten durch altersbedingte Veränderungen der hämostatischen Kaskade, Expression von Wachstumsfaktoren und der Endothelzellen reduziert (Edelberg u. Reed 2003; Reed u. Edelberg 2004). Die Neoangiogenese ist dabei verzögert und in der Folge auch der Prozess der Frakturkonsolidierung. Somit ist beim Älteren nicht in erster Linie die Osteoporose ursächlich für die etwas verzögerte Bruchheilung, sondern eher die verlangsamte Angiogenese sowie im Alter häufiger auftretende Komorbiditäten wie Diabetes. Im Tiermodell konnte an Ratten gezeigt werden, dass sowohl bei jungen als auch bei alten Tieren eine vergleichbare Genexpression mit Höherregulierung der Synthese von Matrix, Zytokinen und Zytokinrezeptorproteinen stattfindet (Meyer et al. 2003).

1.1.3 Periost

Das Periost überzieht den kortikalen Knochen und stellt eine Grenzschicht zwischen Knochengewebe und umgebendem Weichteilmantel dar. Es führt arterielle und venöse Gefäße für den Knochenstoffwechsel sowie feine Nervenfasern zur Innervation des Knochens. Histologisch besteht das Periost aus 2 Schichten: einer äußeren fibrösen Schicht, bestehend aus Fibroblasten, Kollagen, elastischen Fasern sowie einem typischen Netzwerk an Nerven und Mikrogefäßen. Die innere, sog. Kambiumschicht, liegt direkt dem kortikalen Knochen an und ist sehr reich an mesenchymalen Vorläuferzellen, unreifen Knochenvorläuferzellen, Osteoblasten, Fibroblasten, Mikrogefäßen und sympathischen Nervenfasern (Allen et al. 2004). Die Osteoblasten der Kambiumschicht nehmen im reiferen Knochen an Anzahl ab. Gleichzeitig wird das Periost mit zunehmendem Alter dünner, v. a. die Kambiumschicht mit Reduktion der Fibroblastenzahl. Aufgrund der hohen Gefäßdichte finden sich im Periost auch reichlich endotheliale Perizyten, die als pluripotente mesenchymale Stammzellen die Eigenschaft besitzen, sich in verschiedene Zelltypen, u. a. auch in Osteoblasten, differenzieren zu können. Durch humorale (z. B. BMP) oder hormonale (z. B. Parathormon) Faktoren können diese Vorläuferzellen stimuliert und zur Osteogenese aktiviert werden. In-vitro-Studien haben gezeigt, dass periostale Zellen wesentlich geringere Schwellenwerte für mechanische und pharmakologische Stimuli aufweisen als endostale Zellen (Jones et al. 1991; Midura et al. 2003). Periostale Eigenschaften zeigen regionale Unterschiede. So konnten Brommage et al. (1999) im Tierexperiment an adulten Affen zeigen, dass bei gleicher Stimulierung das Ausmaß der Knochenneubildung durch Periost an Radius, Schenkelhals, Femurschaft, Lendenwirbelsäule und Humerusschaft in absteigender Reihenfolge unterschiedlich ist.

- **Das Periost gewährleistet bei Frakturen mit geringer Dislokation die interfragmentäre Verbindung und stellt die Voraussetzung für die Frakturheilung dar. Bei dislozierten Frakturen und erhaltenen Periostbrücken kann bei perkutanen Repositionsmanövern das Prinzip der Ligamentotaxis ausgenutzt werden.**

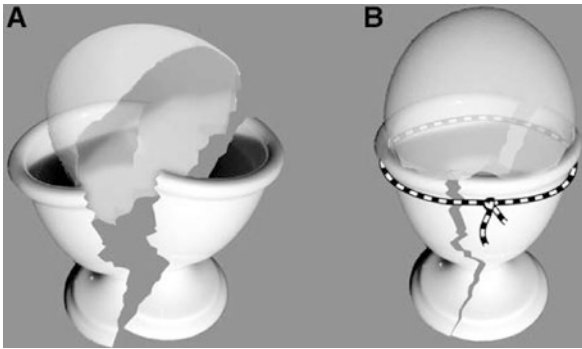
Durch Anheben der Fragmente kommt es zu einer weitgehend anatomischen Ausrichtung durch den periostalen Zugeffekt. Kralinger et al. (2009) haben den kritischen Dislokationsgrad am chirurgischen Hals bestimmt, der zu einer Zerreißen des Periostes sowohl medial als auch lateral führt. In einem biomechanischen Modell einer valgischen Fraktur untersuchten sie an 20 Kadaverpräparaten die kritische Distanz, bei der es bei einer Relativbewegung in der Frontalebene zwischen Schaft und Kopf zur Ruptur des Periostes kommt.

- **Das Periost begann ab einer Verschiebung von durchschnittlich 3 mm einzureißen, mit kompletter Zerreißen bei einer Distanz von 35 mm Verschiebung nach medial und 33 mm Verschiebung nach lateral.**

Die Knochendichte korrelierte mit der maximalen Kraftaufnahme und dem Alter der Präparate. Aus diesen Daten kann man darauf schließen, wie viel Dislokation am medialen Kalkar zu einer Ruptur des sog. Medial Hinge führt. Allerdings können keine direkten Aussagen über die periostalen Gefäße getroffen werden. Ferner muss immer bedacht werden, dass jedes bildgebende Verfahren nur eine Momentaufnahme darstellt und möglicherweise nicht mit dem Grad der Dislokation zum Unfallzeitpunkt übereinstimmt.

1.1.4 Knochendichte

Epidemiologische Daten zeigten, dass die Humeruskopffraktur bei immer älteren Patienten auftritt, vorwiegend weiblichen Geschlechts. Die Knochendichte nimmt mit zunehmendem Alter ab, wobei 70 Jahre als kritische Altersgrenze gelten (Hepp et al. 2009; Lill et al. 2002; Tingart et al. 2003a). Aufgrund des direkten Zusammenhangs mit der reduzierten Knochenqualität im Sinne der Osteoporose gilt die Humeruskopffraktur neben der Wirbelfraktur, hüftnahen Oberschenkel- und Radiusfraktur mittlerweile bereits als Indikatorfraktur dieser systemischen Skeletterkrankung (D'elia et al. 2010; Warriner et al. 2011). Das Wissen um die Areale mit der höchsten Knochendichte erlaubt die Verwendung geeigneter Osteosynthesematerialien sowie deren gezielte Positionierung und Verankerung. Die höchste Knochenmineraldichte und -festigkeit



■ **Abb. 1.2a,b** Eierschalenmodell der osteoporotischen 4-Fragment-Fraktur nach Hertel. **A** 4-Fragment-Fraktur, **B** Eine stabile Rekonstruktion kann durch eine einfache zirkuläre Naht erreicht werden. (Aus Hertel 2005)

konnte im kranialen Abschnitt des Humeruskopfes sowie in den medialen und dorsalen Anteilen nachgewiesen werden (Lill et al. 2002).

Die Knochenqualität am proximalen Humerus nimmt gerade bei der Fragestellung der Osteosynthese eine zentrale Rolle ein. Barvencik et al. (2010) zeigten, dass bei Frauen über 60 Jahren die Knochendichte am Humeruskopf signifikant abnahm. Im Rahmen einer histomorphometrischen Studie an 60 Kadaverschultern konnten die Autoren nachweisen, dass der größte Knochendichteverlust im Bereich des Tuberculum majus auftrat, während subchondral, und hier v. a. superomedial, die höchste Knochendichte erhalten blieb. Dies sollte bei der Verankerung von Osteosynthesematerialien berücksichtigt werden. Eine fortgeschrittene Demineralisierung des Humeruskopfes reduziert die Stabilität von Implantaten, insbesondere von Schrauben (Seebeck et al. 2004). Aufgrund dieser Tatsache wurde in der Literatur die Verwendung dünner und flexibler Implantate zur Stabilisierung osteoporotischer Humeruskopffrakturen empfohlen, um eine bessere Verteilung der wirkenden Kräfte zu gewährleisten (Hertel 2005; Kuiper et al. 1996). Die Steifigkeit eines Implantats muss an die mechanischen Eigenschaften des Knochens angepasst sein. Lill et al. (2003) konnten in einer biomechanischen Arbeit zeigen, dass die hohe Primärsteifigkeit rigider Implantate unter zyklischer Belastung zu einer frühen Lockerung und zum Versagen der Knochen-Implantat-Verbindung führt. Implantate mit einer geringen Steifigkeit und höherer Elastizität minimierten die Belastungsspitzen an der Knochen-Implantat-Grenze, so dass diese besonders geeignet sind für die Stabilisierung osteoporotischer Frakturen. Somit scheint es kritisch, rigide Implantate am Humeruskopf einzusetzen. Auch winkelstabile proximale Humerusplatten zählen zu dieser Gruppe. Durch die winkelstabile Verbindung der Schrauben und der Platte entsteht eine hohe Primärsteifigkeit, die am Humeruskopf aufgrund der insuffizienten Schraubenverankerung in Lockerungen und

sekundärer Schraubenperforation infolge Sinterung bzw. varischer Abkippung des Kalottenfragments resultiert. Auch klingenförmige Implantate stellen keine sinnvollen Alternativen dar. Die hohe Steifigkeit erhöht das Risiko eines Durchschneidens der Klinge durch die subchondrale Kortikalislamelle mit Zerstörung der Gelenkfläche. Daher sollte elastischen bzw. semirigiden Implantaten bei der operativen Versorgung dieser anspruchsvollen und komplikationsträchtigen Frakturen der Vorzug gegeben werden.

Ein äußerst anschauliches Frakturmodell der osteoporotischen Humeruskopffraktur wurde von Hertel (2005) beschrieben. Dabei dient eine Hälfte einer Eierschale als Kalottenfragment und ein mittig gebrochener Eierbecher als Tubercula. Fixiert man die beiden Eierbecherhälften (Tubercula) zirkulär mit einem Gummiband, so liegt die Eierschale (Kalotte) stabil auf (■ **Abb. 1.2**). Dieses Prinzip sollte auch in vivo Anwendung finden, meint Hertel. Der osteoporotische Humeruskopf ist einer Eierschale vergleichbar – ohne brauchbare Knochensubstanz zur Verankerung jeglicher Implantate. Alle Osteosynthesematerialien, die im spongiösen Knochen der Kalotte verankert werden sollen, sind zum Scheitern verurteilt. K-Drähte, die in der subchondralen Knochenlamelle positioniert werden, stützen lediglich die Kalotte, aber nicht die Tubercula, welche zirkulär gefasst werden müssen. Ansonsten kommt es unvermeidlich zu einem Sintern des Kalottenfragments entlang der K-Drähte. Somit kommt laut Hertel der Stabilität des Tuberculablocks die zentrale Rolle in der Osteosynthese osteoporotischer Humeruskopffrakturen zu, damit es zu einem „Aufsitzen“ der Kalotte auf den kortikospongiösen Ring kommen kann.

Hinsichtlich der Messung und Beurteilung der Knochendichte sowie des Osteoporosegrades stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Die Beurteilung bzw. Einschätzung der Knochendichte allein vom Nativröntgenbild ist fehlerhaft und unzulässig. Dies wurde von Olschewski et al. (2001) bereits für das Handgelenk veröffentlicht. Daher müssen präzisere Verfahren zum Einsatz kommen. Diederichs et al. (2006) bestimmten die Knochendichte des Humeruskopfes im Seitenvergleich an 88 humanen Kadaverpräparaten mit einem durchschnittlichem Alter von 72 ± 14 Jahren mittels peripherer quantitativer Computertomographie (pQCT). Dabei wurde die Korrelation mit der Knochendichte am distalen Humerus ipsilateral sowie kontralateral untersucht. Für den proximalen Humerus wurde dabei eine mittlere Knochendichte von $0,126 \text{ g/cm}^3$ für die linke Seite und $0,117 \text{ g/cm}^3$ für die rechte Seite ohne statistisch signifikanten Unterschied ermittelt. Die Knochendichte am distalen Humerus war um ca. 50 % höher. Zudem konnte gezeigt werden, dass Frauen eine um ca. $\frac{1}{3}$ verminderte Knochendichte im Vergleich zu Männern hatten und die mittlere Knochendichte der Präparate mit einem Alter >70 Jahren eine signifikant nied-

rigere Knochendichte aufwiesen als Präparate <70 Jahre. Somit korrelierte die Knochendichte am Humeruskopf mit $R^2 = 0,74$ mit der kontralateralen Seite und nur mit $R^2 = 0,40$ mit dem ipsilateralen distalen Humerus. Für die routinemäßige Anwendung in der Praxis eignet sich die pQCT allerdings nicht. Hier können Messungen mithilfe spezieller Softwaretools aus herkömmlichen Spiral-CT-Untersuchungen valide Knochendichtewerte liefern (Krappinger et al. 2012; Tingart et al. 2003b). Im Gegensatz zur DEXA-(Dual-Energy-X-Ray-Absorptiometry-)Messung steht mittlerweile in den meisten Notaufnahmen und Abteilungen für Orthopädie und Unfallchirurgie ein CT zur Verfügung, was eine eventuelle präoperative Bestimmung der Knochenmineraldichte ermöglicht. Noch einfacher ist der Rückschluss der Knochenqualität aus Messungen der Kortikalisdicke an der proximalen Humerusdiaphyse, was allerdings ein standardisiertes und präzises Nativröntgen voraussetzt (Tingart et al. 2003a).

Es liegt nahe anzunehmen, dass das Frakturmuster mit sinkender Knochendichte komplexer wird im Sinne einer Zunahme der Mehrfragment- bzw. Trümmerfrakturen. Diese Annahme wurde von einer epidemiologischen Beobachtungsstudie in Schottland bestärkt, die zeigte, dass Patienten mit komplexen Humeruskopffrakturen älter waren (Court-Brown et al. 2001). Diese theoretische Einschätzung wurde allerdings von Osterhoff et al. (2012) wissenschaftlich widerlegt. An 20 intraoperativ gewonnenen Knochenzylindern aus der Eintrittsstelle eines proximalen Humerusnagels wurden mittels Mikro-CT-Untersuchungen verschiedene Parameter der kortikalen und spongiosen Knochenstruktur erhoben und mit 20 Proben aus unverletzten Kadaverschultern verglichen. Zusätzlich erfolgte die biomechanische Testung. Dabei zeigte sich kein statistisch signifikanter Unterschied hinsichtlich der im Mikro-CT quantifizierten sowie biomechanisch validierten Parameter zwischen den 2-Segment-Frakturen und komplexen Mehrsegmentfrakturen sowie den gesunden Kontrollpräparaten. Somit dürften wohl eher andere Faktoren als die osteoporotisch bedingte reduzierte Knochendichte, wie Sturzmechanismus und Größe der einwirkenden Kräfte, für die Entstehung komplexer Frakturen beim älteren Patienten ausschlaggebend sein.

Wenige Daten in der Literatur existieren hinsichtlich Einfluss des Alters und der Osteoporose auf die Frakturheilung. Eine Studie an 436 Patienten mit Schenkelhalsfrakturen zeigte, dass das Alter keinen negativen Einfluss auf die knöcherne Heilungsrate hatte (Nieminen et al. 1981). In einer Studie an komplexen Frakturen der unteren Extremität konnte nachgewiesen werden, dass höheres Alter nicht mit einer erhöhten Rate an Fehlstellungen assoziiert war, aber eine volle Belastung sowie eine komplette Frakturkonsolidierung etwas verzögert erreicht werden konnten (Hee et al. 2001). In tierexperimentellen Studien konnte

an Ratten nach Ovariectomie (führt durch Absinken des Östrogenspiegels zu Osteopenie bzw. Osteoporose) kein Unterschied in der Frakturheilung zur nicht ovariectomierten Kontrollgruppe festgestellt werden. Allerdings muss bei der Behandlung osteoporotischer Frakturen das erhöhte Risiko des Repositionsverlusts mit Veränderung der Frakturgeometrie bedacht werden. Eine erhöhte interfragmentäre Distanz mit zunehmender Diastase des Frakturspalts kann den Heilungsprozess mit Kallusformation negativ beeinflussen und damit zu einer Verlängerung des Zeitraums der Frakturkonsolidierung führen.

1.1.5 Prognostische Kriterien

Aus biologischer Sicht gibt es verschiedene Faktoren, die Aussagen über das Heilungspotenzial bzw. das Auftreten von Komplikationen wie einer posttraumatischen avaskulären Humeruskopfnekrose oder einer Pseudarthrose zulassen. Entscheidend dabei ist der Durchblutungsstatus des Kalottenfragments. Diesen in vivo zu bestimmen, ist schwierig und erlaubt lediglich eine Aussage über die Ischämiesituation unmittelbar nach dem Trauma. Posttraumatische Revaskularisierungsprozesse sind einer objektiven Beurteilung bzw. Messung nicht zugänglich und selbst mithilfe moderner bildgebender Verfahren nicht ausreichend möglich. Hertel hat im Jahr 2004 eine Pionierarbeit zu dieser Fragestellung veröffentlicht und 3 primäre Prädiktoren einer Ischämie des Humeruskopfes unmittelbar nach der Verletzung identifiziert (Hertel et al. 2004). An 100 intrakapsulären Humeruskopffrakturen wurde intraoperativ die Durchblutung des Kalottenfragments evaluiert. Als intrakapsulär wurden dabei alle Frakturen definiert, bei denen zumindest eine Frakturkomponente proximal des chirurgischen Halses liegt. Das Durchschnittsalter der Patienten lag bei 60 Jahren mit einem durchschnittlichen Zeitintervall von 4 Tagen (0–10 Tagen) zwischen Unfall und operativer Versorgung. Als Evaluierungsverfahren einer vorhandenen Kopfdurchblutung wurde entweder das Kalottenfragment angebohrt mit Beurteilung des Blutrückflusses aus dem Bohrkanal, oder es wurde eine Messung mittels Laser-Doppler-Sonde mit Beurteilung eines pulsatilen, EKG-synchronisierten Signals durchgeführt.

➤ **Als Hauptparameter der erhaltenen Kopfdurchblutung gelten ein Kalkarsegment >8 mm, ein intaktes mediales Scharnier (Hinge) und eine Fraktur am anatomischen Hals (Typen 2, 9, 10, 11 und 12 gemäß der Hertel-Klassifikation).**

Lag die Kombination aus kurzem Kalkarsegment <8 mm, zerstörtem medialem Hinge und Fraktur des anatomischen Halses vor, belief sich die Wahrscheinlichkeit einer

Ischämie des Humeruskopfes sogar auf 0,97. Weitere Risikofaktoren wie das Vorliegen einer 4-Segment-Fraktur (0,67), Angulation des Kalottenfragments $>45^\circ$ (0,62), Verschiebung der Tubercula >10 mm (0,61), Vorliegen einer Luxationsfraktur (0,49), Head-Split-Frakturen (0,49) und Vorliegen einer 3-Segment-Fraktur (0,38) hatten eine untergeordnete Bedeutung hinsichtlich der intraoperativen Ischämie des Kopffragments.

Allerdings sollte von der intraoperativ festgestellten Ischämie des Humeruskopfes noch kein voreiliger Schluss hinsichtlich der Entwicklung einer avaskulären Kopfnekrose gezogen werden. Denn das Revaskularisierungspotenzial des menschlichen Körpers von Knochengewebe wird auch durch die guten und verlässlichen Einheilungsraten von freien Knochentransplantaten (z. B. auto- oder allogene Beckenkammspäne in der Wirbelsäulenchirurgie oder beim Glenoidaufbau) untermauert. Selbst frei auf dem OP-Tisch liegende Kalottenfragmente konnten erfolgreich zur Einheilung gebracht werden und zeigten, welch hohes biologisches Potenzial der Neovaskularisation der menschliche Körper gerade bei jüngeren Patienten aufweist. Dies konnte von Bastian u. Hertel (2008) in einer klinischen Nachuntersuchungsstudie eindrucksvoll aufgezeigt werden. Patienten aus der Studie, bei denen im Rahmen der chirurgischen Versorgung intrakapsulärer Frakturen intraoperativ die Ischämie des Humeruskopfes evaluiert worden war (Hertel et al. 2004), wurden nach durchschnittlich 5 Jahren klinisch und nativradiologisch nachuntersucht. In jener Gruppe, in der intraoperativ eine erhaltene Durchblutung nachgewiesen war, wiesen 67 % keine radiologischen Zeichen der Nekrose, 20 % strukturelle knöcherne Veränderungen und 13 % einen Kollaps der subchondralen Knochenlamelle unterschiedlichen Schweregrades, d. h. Zeichen der Nekrose auf. In der Gruppe mit intraoperativ nachgewiesener Ischämie zeigten 80 % strukturelle knöcherne Veränderungen, während 20 % nekrotisch waren. Das klinische Ergebnis brachte 80 Punkte gemäß dem Constant-Score für jene Patientengruppe ohne radiologische Veränderungen, 81 Punkte für jene mit strukturellen radiologischen Veränderungen und lediglich 68 Punkte für Patienten mit radiologischen Zeichen des Kollapses der Kalotte. Damit war bewiesen, dass ein sehr hoher Anteil selbst initial ischämischer Kalottenfragmente nach stabiler Osteosynthese im Rahmen der Revaskularisierung erhalten werden kann mit damit verbundenen zufriedenstellenden klinischen Ergebnissen. Als Erklärung für die Entwicklung einer völlig unerwarteten posttraumatischen avaskulären Humeruskopfnekrose bei 14 % in der Gruppe der primär vitalen Kopffragmente nennen die Autoren eine möglich falsch-positive intraoperative Durchblutungsmessung, eine Kompromittierung der Vaskularisierung durch das Repositionsmanöver, die Osteosynthese bzw. eine postoperativ/traumatisch auftretende Thrombose.

➤ **Nichtsdestoweniger sollte das Revaskularisierungspotenzial des Kalottenfragments nie unterschätzt werden und zumindest ein Versuch der kopferhaltenden Rekonstruktion unternommen werden.**

In der Mehrheit der Fälle kann bei vermeintlich avaskulärer Situation des Humeruskopfes mittelfristig eine Nekrose vermieden werden. In jedem Fall muss auf eine anatomische Reposition mit Stellung der Tubercula geachtet werden. Damit sind günstige Voraussetzungen für ein gutes Ergebnis bei Notwendigkeit eines eventuellen späteren Kopfersatzes beim Auftreten einer posttraumatischen avaskulären Kopfnekrose geschaffen.

Neben der Gefahr einer posttraumatischen avaskulären Humeruskopfnekrose durch die traumatisch bedingte Ischämie müssen morphologische Kriterien zur Beurteilung des funktionellen Outcomes mitberücksichtigt werden. Klare Aussagen zur Toleranzgrenze von Fehlstellungen der einzelnen Fragmente gibt es in der Literatur wenige, zum Teil sind diese sogar konträr. Hardeman et al. (2012) und Solberg et al. (2009) beobachteten schlechtere Ergebnisse bei Varusfehlstellungen, während Foruria et al. (2011) posteromediale Impaktionsfrakturen, laterale Impaktionsfrakturen und nach medial dislozierte Tuberculum-majus-Frakturen mit resultierendem sekundärem mechanischem Impingement am dorsalen Glenoidrand als klinisch prognostisch negative morphologische Faktoren identifizieren konnten. Letztere sind v. a. für den Schulterschmerz verantwortlich. Jede um 10 mm höhere Dislokation gegenüber der Gelenkfläche führt zu einer Erhöhung des VAS-Schmerzscores (VAS: visuelle Analogskala) um 0,8 Punkte. In Varusstellung impaktierte Frakturen zeigten hingegen die größte Bewegungseinschränkung in Elevation und Außenrotation.

1.2 Frakturmorphologie

Die Kriterien, anhand derer eine Humeruskopffraktur eingestuft und klassifiziert wird, haben sich seit dem Erscheinen der ersten Klassifikation im Jahr 1934 durch Codman (1934) gewandelt. War es initial eine rein deskriptive Beschreibung der Anzahl der Fragmente, so haben Aspekte wie Varus-/Valgusfehlstellung, Länge des posteromedialen Spickels oder Integrität des medialen Hinge aufgrund ihrer hohen prognostischen Wertigkeit an Bedeutung gewonnen und werden im Rahmen neuerer Arbeiten als wichtige morphologische Kriterien genannt. Auch haben sich die Toleranzgrenzen der Fragmentdislokation sowie -verkipfung als Entscheidungsfindung für ein operatives Vorgehen im Laufe der letzten Jahre verändert. Allerdings muss klar gesagt werden, dass auch heute noch evidenzbasierte und harte Richtlinien zur Operationsindikation

fehlen und der Graubereich zwischen konservativer und operativer Versorgung groß ist. Zudem stellt sich gerade bei Mehrfragmentfrakturen mit Indikation zur operativen Versorgung immer noch die Frage, ob Rekonstruktion oder Frakturprothese. Und wenn eine Osteosynthese angestrebt wird, mit welchem Implantat? Grundsätzlich sollte eine Klassifikation ein diagnostisches Tool darstellen, welches sich durch Simplizität, hohe Praktikabilität, Reproduzierbarkeit und Übereinstimmung zwischen den Untersuchern (sog. Inter- und Intraobserver Reliability) auszeichnet. Zudem sollte sie gewisse therapeutische und prognostische Aussagen zulassen, um dem Arzt im oft schwierigen Entscheidungsprozess über die Behandlungsmaßnahmen Hilfestellung zu bieten. Sind alle diese Kriterien erfüllt, dann kann dem Anspruch auf Vollständigkeit stattgegeben werden. Allerdings steht trotz neuer Versuche kein aktuelles Klassifikationssystem für Humeruskopffrakturen zur Verfügung, das all diese Kriterien erfüllt und somit ausgereift und praxisfähig zu sein scheint.

Im Folgenden sollen die Klassifikationen der Humeruskopffraktur mit Bezugnahme auf die morphologischen Kriterien kurz in chronologischer Reihenfolge dargestellt und die Entwicklung neuerer deskriptiver Systeme vorgestellt werden.

1.2.1 Klassifikationssysteme

Codman-Klassifikation

Codman beschrieb im Jahr 1934 erstmals die 4 Hauptfragmente am Humeruskopf und die daraus resultierenden 12 möglichen Frakturmuster (Codman 1934). Als Hauptfragmente nannte er das artikuläre Kalottenfragment, welches durch den anatomischen Hals definiert ist, das Tuberculum majus und minus sowie das Schaffragment. Die Frakturlinie zwischen dem artikulären Fragment und den Tubercula entspricht dabei ungefähr der ehemaligen Epiphysenfuge. Codman unterschied zwischen intra- und extrakapsulären Frakturen. Eine wichtige Rolle nahmen bereits damals Periost und Rotatorenmanschette ein, die wesentlich zur Stabilisierung der Fragmente beitragen. Als Sonderform der Humeruskopffraktur erwähnte Codman die knöchernen Avulsionsverletzung der Supraspinatussehne, die äquivalent zur rein tendinösen Verletzung zu behandeln sei. Eine zentrale Stellung kam der subakromialen Bursa zu. Codman beschrieb sie bei den allermeisten Frakturen als intakt. Aus der Übersichtsgraphik der Erstbeschreibung erscheint die lange Bizepssehne immer als am Tuberculum-majus-Fragment anliegend, was nicht ganz der Realität entspricht. Denn die Frakturlinie zwischen den beiden Tubercula verläuft regelhaft einige wenige Millimeter lateral des Sulcus intertubercularis. Hinsichtlich der Prognose hebt Codman die Lage des Ka-

lottenfragments hervor. Solange dieses zwischen Glenoid und Tubercula liegt und dort einheilt, sind einigermaßen gute funktionelle Ergebnisse zu erwarten. Als sehr häufige Frakturform wird die klassische subkapitale Fraktur mit Verlagerung des Schaftes nach ventral, Retrotorsion des Kopfes und kalkarnaher Impaktion des Schaftes in den spongiösen Knochen beschrieben. Als besondere Form wird die Impressionsfraktur des Tuberculum majus genannt. Dabei kommt es durch direkte Krafteinwirkung zur Impaktion des Tuberculum majus in die Kalotte. Keine der späteren Klassifikationen greift diese Frakturform wieder auf.

► **Codman präsentiert in seiner Pionierarbeit die erste offizielle Klassifikation von Humeruskopffrakturen. Es handelt sich dabei lediglich um eine deskriptive Einteilung in die 4 Hauptfragmente.**

Dabei wird kein Bezug auf möglich Dislokationsgrade, Achsenfehlstellungen bzw. zusätzliche Luxationsformen genommen. Angedeutet wird, dass aus therapeutischer Sicht die meisten Frakturen konservativ, mit leichter Traktion in Außenrotationsstellung, behandelt werden können. Prognostisch ungünstig sind Mehrfragmentfrakturen sowie stark dislozierte und übersehene bzw. vom Patienten ignorierte Frakturen.

Neer-Klassifikation

Charles Neer veröffentlichte 1970 eine Klassifikation der Humeruskopffraktur, die als weiterer Meilenstein in die Literatur einging. Trotz gewisser Schwächen stellt sie aufgrund ihrer hohen Praktikabilität und Simplizität bis heute immer wieder die Referenzarbeit schlechthin dar. Anhand der Röntgenbilder, intraoperativer Befunde sowie Fotografien von 300 akuten Humeruskopffrakturen entwickelte Neer seine neue, rein deskriptive Klassifikation. Basierend auf den 4 Hauptfragmenten, welche bereits Codman beschrieb, beschränkt sich Neer lediglich auf die dislozierten Frakturen. Denn alle nicht oder kaum dislozierten Frakturen verhalten sich unabhängig von der Anzahl der Fragmente bezüglich Therapie und Prognose ähnlich. Somit wurden die Frakturen in 6 Gruppen eingeteilt (▣ Abb. 1.3). 85 % fielen in Gruppe I der minimal dislozierten Frakturen. Als Grenze benannte Neer 1 cm Fragmentverschiebung bzw. 45° Fragmentverkipfung. Gruppe II umfasst die Frakturen des anatomischen Halses, die aufgrund von Fehlheilung oder avaskulärer Kopfnekrose zu einer Einschränkung des Schultergelenkes führen können. Gruppe III beinhaltet die Frakturen des chirurgischen Halses mit Verschiebung um mehr als 1 cm bzw. Verkipfung von mindestens 45°. Trotz der Frakturausläufer nach proximal halten Weichteilverbindungen und die Rotatorenmanschette den Kopf in korrekter Rotationsstel-

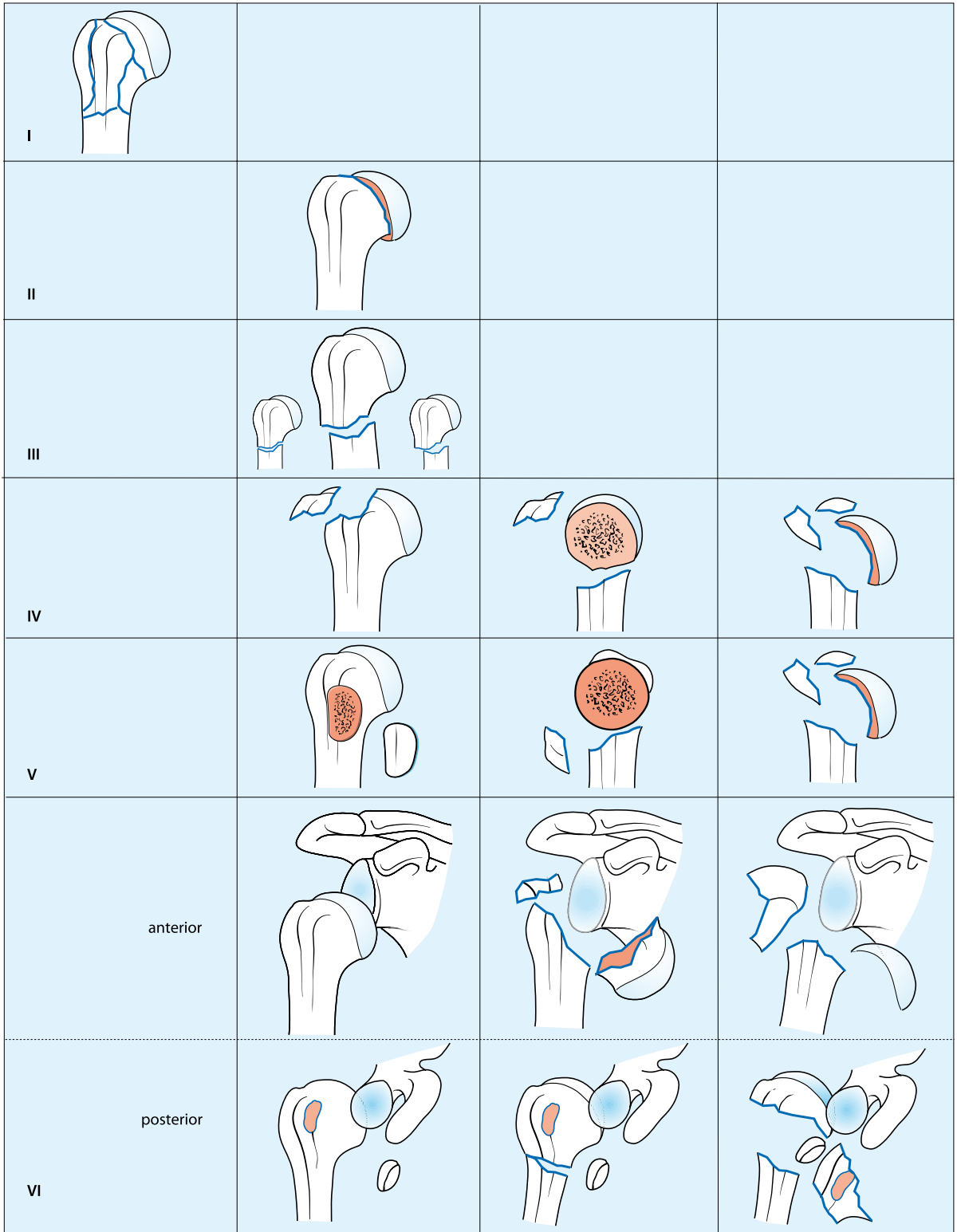


Abb. 1.3 Modifizierte Darstellung der Neer-Klassifikation. (Mod. nach Neer 1970)

lung. Bei Erwachsenen gibt es 3 Subtypen der Gruppe III: Die verkippte subkapitale Fraktur ist impaktiert mit intaktem posteriorem Periost, die dislozierte subkapitale Fraktur ist gekennzeichnet durch die Verschiebung des Schaftes nach medial und ventral, dem Zug des Musculus (M.) pectoralis major folgend, der 3. Subtyp ist die subkapitale Trümmerfraktur mit mehrfragmentärer Situation am proximalen Schaft. Gruppe IV stellen die Frakturen des Tuberculum majus mit Dislokation über 1 cm dar. Neer beschreibt dabei eine stets begleitende, pathognomonische Längsruptur der Rotatorenmanschette, die entweder am Rotatorenintervall oder weiter dorsal verläuft, wenn nur die hintere Facette des Tuberculum majus (Ansatz des M. infraspinatus) beteiligt ist. Bei zusätzlicher Dislokation am chirurgischen Hals kommt es durch Zug über den M. subscapularis zur Innenrotationsstellung des Kopfes mit Notwendigkeit der offenen Reposition. Allerdings ist die Durchblutung in aller Regel über die ventralen Strukturen erhalten. Die Frakturen des Tuberculum minus bilden die Gruppe V. Begleitende subkapitale Frakturen im Sinne der 3-Segment-Fraktur führen zur Außenrotations- bzw. Abduktionsfehlstellung des Humeruskopfes, dem Zug der posterosuperioren Rotatorenmanschette folgend. Während hier allerdings die vaskuläre Versorgung nicht gefährdet ist, stellen 4-Segment-Frakturen mit zusätzlicher Dislokation des Tuberculum majus Hochrisikofrakturen hinsichtlich der Durchblutung dar. Das artikuläre Fragment ist dabei regelhaft nach lateral zwischen die beiden retrahierten Tubercula disloziert. Gruppe VI umfasst die Luxationsfrakturen mit möglichen zusätzlichen Avulsionsfrakturen der Tubercula. In diese Gruppe fallen auch Hill-Sachs-Läsionen, Reversed Hill-Sachs-Läsionen sowie zentrale Impaktionsfrakturen im Sinne von Head-Split-Frakturen.

Auch bei dieser Klassifikation handelt es sich um eine rein deskriptive Klassifikation mit morphologischer Berücksichtigung der 4 Hauptfragmente am Humeruskopf und deren Verschiebung bzw. Verkipfung. Keine Angaben macht Neer in seiner Arbeit, warum gerade 1 cm und 45° als Grenzwerte herangezogen wurden.

AO-Klassifikation

Die AO-Klassifikation (AO: Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthese) der proximalen Humerusfrakturen wurde erstmals 1990 beschrieben (Müller et al. 1990). Sie unterscheidet 27 Untergruppen, basierend auf der Lokalisation, der artikulären Beteiligung, dem Vorliegen einer Trümmerzone bzw. einer assoziierten Luxation mit zusätzlichem Augenmerk auf die Durchblutungssituation. Es werden 3 Hauptgruppen unterschieden: Gruppe A umfasst extraartikuläre unifokale Frakturen mit erhaltener Durchblutung, Gruppe B extraartikuläre bifokale Frakturen mit möglicher teilweise Kompromittierung der Durchblutung

und Gruppe C artikuläre Frakturen mit erhöhtem Risiko der posttraumatischen avaskulären Nekrose. 3 Untergruppen (1, 2, 3) bezogen auf das Frakturmuster und jeweils 3 weitere Subtypen (1, 2, 3) bezogen auf die Trümmerzone ergeben insgesamt 27 verschiedene Frakturmuster (Abb. 1.4). Zudem unterscheidet diese Klassifikation valgisch impaktierte 4-Segment-Frakturen von anderen 4-Segment-Frakturen mit teilweise erhaltener Durchblutung über die medialen Kapselgefäße. Die primär morphologische Einteilung richtet sich bei der AO-Klassifikation somit nach der Beteiligung des Kalottenfragments, der Anzahl der Fragmente, dem Dislokationsgrad, einer begleitenden Luxation, nach Varus- oder Valgusfehlstellung und Einstauchung.

Die AO-Klassifikation hat sich aufgrund ihrer Komplexität im klinischen Alltag nicht durchsetzen können. Allerdings muss ihr zugutegehalten werden, dass neben dem rein deskriptiven, pathomorphologischen Charakter auch vaskularitätsbezogene Kriterien mit berücksichtigt wurden, die Aussagen über mögliche Therapieentscheidungen und Prognose zulassen.

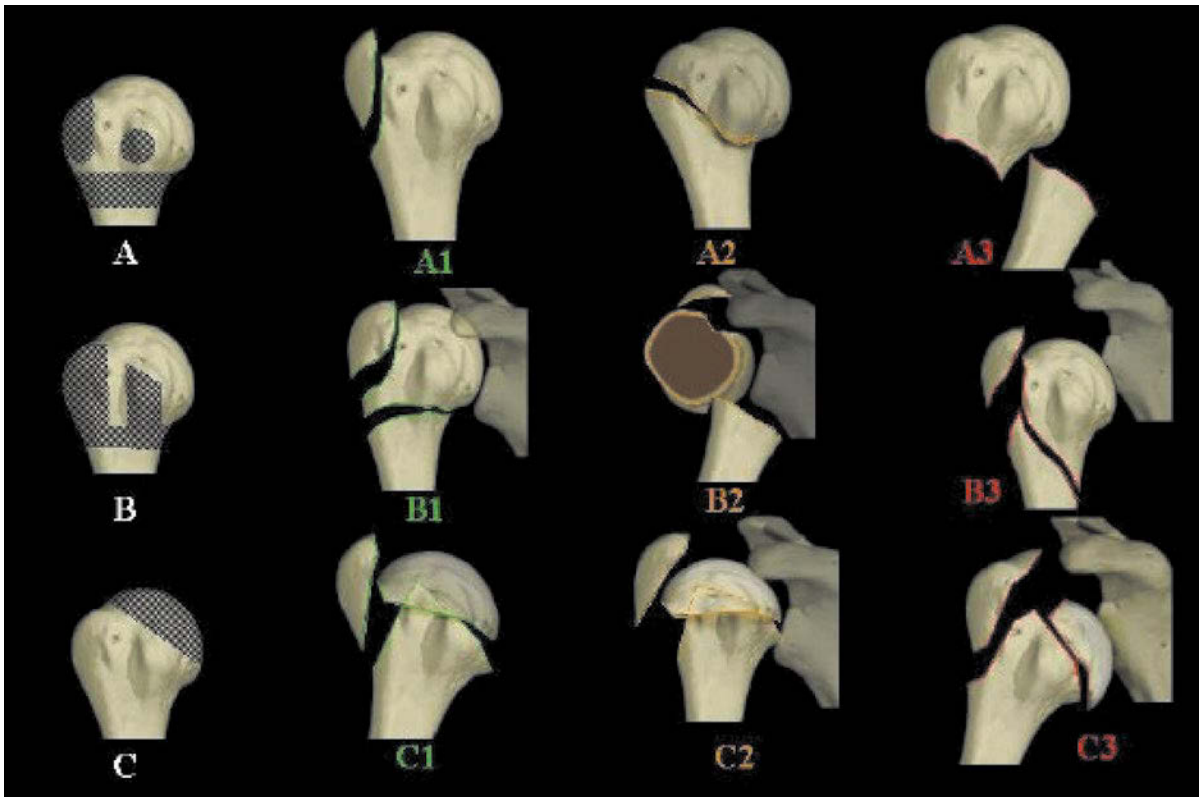
Habermeyer-Klassifikation

Die Habermeyer-Klassifikation (Habermeyer u. Schweiberer 1989) stellt eine Weiterentwicklung der Neer-Klassifikation unter Berücksichtigung eines intra- und extrakapsulären Frakturverlaufs dar. Als Typ-0-Frakturen werden nicht oder gering dislozierte Frakturen bezeichnet. Typ-A-Frakturen umfassen das Tuberculum majus (A1) und minus (A2), Typ-B-Frakturen verlaufen am chirurgischen Hals und Typ-C-Frakturen am anatomischen Hals. Typ-B- und Typ-C-Frakturen können jeweils 2–4 Fragmente aufweisen. Die Luxationsfrakturen (Typ-X) werden im Gegensatz zur Neer-Klassifikation erst nach Reposition klassifiziert. Ventrale Luxationen werden mit Grad 1, dorsale mit Grad 2 beziffert.

Modifizierte Codman-Klassifikation nach Hertel (LEGO-Klassifikation)

Basierend auf der Frakturklassifikation von Codman (1934) haben Hertel et al. eine modifizierte binäre deskriptive Klassifikation entwickelt (Hertel et al. 2004). Ausgehend von den 4 Hauptfragmenten wurden die verschiedenen Frakturebenen definiert und mithilfe von LEGO-Bausteinen bildlich dargestellt (Abb. 1.5). Über 5 Fragen, die mit Ja oder Nein beantwortet werden, können die Frakturebenen eindeutig identifiziert werden:

1. Liegt eine Fraktur zwischen Tuberculum majus und dem Kopf vor?
2. Liegt eine Fraktur zwischen Tuberculum majus und Schaft vor?
3. Liegt eine Fraktur zwischen Tuberculum minus und dem Kopf vor?



■ **Abb. 1.4** Klassifikation der AO (Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthese) der Oberarmkopffrühe. Als A-Frakturen werden Brüche außerhalb des Gelenkes bezeichnet, B-Frakturen verlaufen partiell im Gelenk und C-Frakturen sind Brüche, die den gelenktragenden Teil betreffen. Mit aufsteigender Zahl (1, 2, 3) steigt auch der Schweregrad der Fraktur

4. Liegt eine Fraktur zwischen Tuberculum minus und Schaft vor?
5. Liegt eine Fraktur zwischen Tuberculum minus und majus vor?

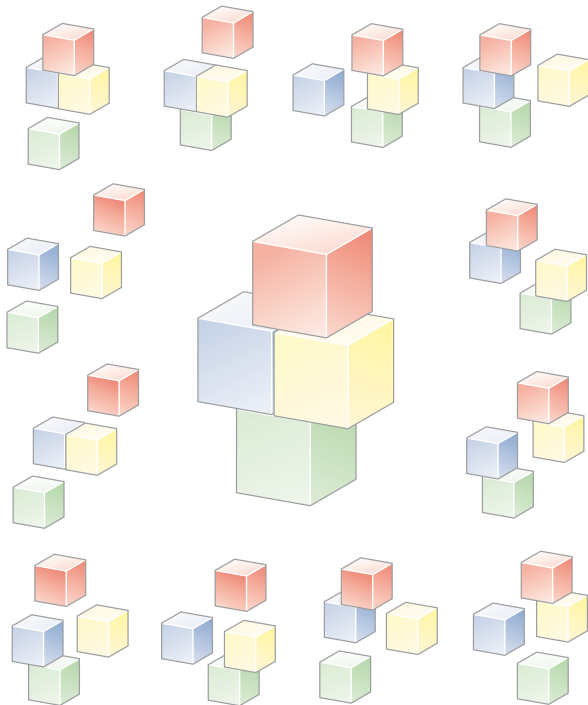
Alle möglichen 12 Frakturmuster wurden abgebildet und konsekutiv von 1–12 nummeriert: 6 Frakturkombinationen stellen 2-Segment-Frakturen dar, 5 3-Segment-Frakturen und 1 Frakturtyp die 4-Segment-Fraktur. 2 zusätzliche Sonderformen stellen Head-Split-Frakturen dar, bei denen einmal das Kalottenfragment mit erhaltener Durchblutung zentral frakturiert ist, und einmal ein freies artikuläres Fragment ohne Durchblutung vorliegt.

Auch bei der Codman-Hertel-Klassifikation handelt es sich um eine rein deskriptive Klassifikation mit morphologischer Orientierung an den 4 Hauptfragmenten und den daraus resultierenden möglichen Frakturkombinationen. Es fließen keine Informationen hinsichtlich Dislokation/Verkipfung der Fragmente oder Pathomechanismus ein. In erster Linie ging es aber in dieser Arbeit darum herauszufinden, welche Frakturtypen mit einem hohen Risiko der gestörten Kopfdurchblutung einhergehen. Dabei erwiesen sich alle Frakturtypen, bei denen die Frakturlinie entlang des anatomischen Halses (Frakturtypen 2, 9, 10,

11 und 12) verlief, als besonders gefährdet. Zusätzliche Risikofaktoren für eine Minderperfusion des artikulären Segments waren ein kurzes posteromediales Kalkarfragment <8 mm sowie eine Zerstörung des medialen Scharniers (► Abschn. 1.1.5).

HCTS-Klassifikation nach Resch

Ein neuer Ansatz der Frakturklassifikation (Hirzinger et al. 2011; Majed et al. 2011) soll neben der Anzahl der Fragmente auch den Pathomechanismus und die Art der Fehlstellung in den verschiedenen Ebenen mit einbeziehen und damit eine dreidimensionale Einteilung unter Mitberücksichtigung prognostischer Kriterien wie der Länge des Kalkarfragments bzw. der Verschiebung am medialen Scharnier erlauben. An 200 prospektiv gesammelten akuten Humeruskopffrakturen erwachsener Patienten wurde gemäß einem standardisierten Protokoll die Frakturmorphologie erfasst und analysiert. Für alle Frakturen lagen digitale Röntgenbilder in 2 Ebenen (anterior-posterior [a.-p.] und transskapulär) sowie CT-Bilder mit multiplanaren und 3-D-Rekonstruktionen vor. Es wurden 4 zentrale anatomische Landmarks zur Beurteilung herangezogen: das Kopffragment (*H* head), der Kalkar (*C* calcar), die Tubercula (*T* tuberosities) und der Schaft (*S* shaft).



■ **Abb. 1.5** Die Codman-Hertel-Klassifikation zeigt 12 mögliche Frakturtypen gemäß der 5 Frakturebenen am Humeruskopf illustriert an LEGO-Bausteinen. (Aus Hertel et al. 2004)

Das Kopffragment wird anhand von 4 Kriterien beschrieben:

1. Stellung in der koronalen Ebene mit Varus- bzw. Valgusposition,
2. Stellung in der sagittalen Ebene mit Flexions- bzw. Extensionsstellung,
3. Vorliegen einer Luxationsfraktur nach ventral oder dorsal und
4. Vorliegen einer Head-Split-Fraktur.

Weitere Kriterien waren der Kalkar mit Längenmessung der posteromedialen metaphysären Ausdehnung sowie Messung der Verschiebung des medialen Scharniers, die Tubercula mit Tuberculum majus und Tuberculum minus und das Schaftfragment, wobei als relevante Verschiebung $\frac{1}{2}$ Schaftbreite galt. Zusätzlich wurde die Anzahl der Fragmente erfasst. Grundsätzlich wurde gemäß der Daten von Foruria et al. (2011) eine Angulation von 20° als relevant erachtet und alle Frakturen, die weniger Dislokation aufwiesen, wurden als nicht bzw. minimal disloziert bewertet. Dies betraf 25 % der Frakturen, während 75 % mehr als 20° Angulation aufwiesen. Primäre morphologische Kriterien der Fraktуреinteilung waren die Position des Kopffragments in der Koronal- und Sagittalebene. Diesbezüglich konnten folgende Frakturformen identifiziert werden:



■ **Abb. 1.6a,b** 3-D-CT einer Varusimpaktionsfraktur. a) Sicht von hinten zeigt Varusstellung, mediale Eintauchung und fehlende laterale Frakturdistanz, b) Sicht von lateral zeigt Kippung des Kopfes nach hinten (Flexionsstellung)

■ Varusfrakturen

43 % aller Frakturen fielen in diese Gruppe. Dabei stand das Kopffragment varisch zum Schaft.

➤ **Es werden 2 Formen der Varusfraktur unterschieden: Varusimpaktions- und Varusavulsionsfrakturen.**

■ ■ Varusimpaktionsfrakturen

Varusimpaktionsfrakturen sind charakterisiert durch eine Eintauchung des Schaftes in das Kalottenfragment mit posteromedialer Abkippung desselben (■ **Abb. 1.6**), wobei an der lateralen Kortikalis am chirurgischen Hals keine interfragmentäre Diastase besteht und somit das Periost dort intakt ist. Die laterale Kortikalis kann äquivalent zur medialen Seite als Scharnier bezeichnet werden. Zudem ist die Varusimpaktionsfraktur durch ein intaktes posteromediales Periost gekennzeichnet, was sich prognostisch günstig hinsichtlich der Durchblutung auswirkt. Diese Frakturform wurde in 43 % aller Varusfrakturen gefunden, wobei in 57 % der Fälle zusätzlich die Eintauchung in der Sagittalebene 20° überschritt. 35 % der Varusimpaktionsfrakturen wiesen 2 Fragmente, 54 % 3 Fragmente und 11 % 4 Fragmente auf.

■ ■ Varusavulsionsfrakturen

Varusavulsionsfrakturen sind gekennzeichnet durch eine Diastase zwischen dem Kopffragment und dem Schaft am „lateralen Scharnier“ mit Dislokation des Schaftes in aller Regel nach ventral bzw. ventromedial in Relation zum Kopffragment (■ **Abb. 1.7**). Durch die Fragmentdiastase ist in aller Regel das Periost zerrissen, mit negativer Konsequenz für Reposition und Durchblutung. Durch fehlenden Periostzug ist daher das Kopffragment in der Sagittalebene häufig in Neutralstellung (47 %). Varusavulsionsfrakturen stellten 57 % aller Varusfrakturen dar und gingen in 35 % der Fälle mit 2 Fragmenten, in 49 % mit 3 und in 16 % mit 4 Fragmenten einher. In 4 Fällen (4,7 %) war die Verschiebung des Tuberculum majus dermaßen, dass der Kopf durch den Zug des M. subscapularis innenrotiert war.