

## 4 Standfestigkeit und Wölbtechnik

Die Standfestigkeit der alten Gewölbebauten ist ein weites Feld der Diskussionen unter Spezialisten. Im vorliegenden Kapitel werden die unterschiedlichen Positionen und Probleme anhand einer Analyse der konstruktiven Besonderheiten von mittelasiatischen Tonnen- und Kuppelgewölben aus Lehmziegeln einander gegenübergestellt und verglichen.

### 4.1 Zur Statik der Lehmziegelgewölbe

Die Statik ist die Lehre über das Kräftegleichgewicht und die Wechselwirkungen der Kräfte innerhalb eines Körpers. Die Lehre und die Grundlagen der modernen Theorie des Gewölbes wurden seit dem 16. Jahrhundert entwickelt<sup>528</sup>. Die Gesetze der Statik werden bei der Analyse von Konstruktionen architektonischer Anlagen Mittelasiens und der Ausarbeitung von Restaurierungsprojekten von Ingenieuren, Restauratoren und Architekten angewandt<sup>529</sup>. Im Jahre 1950 schrieb L. VORONIN, dass "die Untersuchung der Konstruktionen antiker Bauten Mittelasiens hinter der Erforschung ihrer Architektur stark zurücksteht"<sup>530</sup>. Dennoch berühren einige Wissenschaftler die Statik von Gewölbebauten<sup>531</sup>. Zeichnerische Analysen und Berechnungen wurden für Überwölbungen vor allem mittelalterlicher Baudenkmäler in Sogdien, Chorezmien und Margiana vorgenommen<sup>532</sup>.

Die Statik von Lehmbauten wurde nicht untersucht, da man hier keine restauratorische Aufgabe und keine Notwendigkeit der Konstruktionsanalyse *in situ* sah, obwohl Gebäude, die Jahrtausende überdauerten, von der Kompetenz ihrer Erbauer auch im Hinblick auf die Grundlagen der Statik zeugen. Ein Synonym für Architektur im Mittelalter war "Ingeneria" - der Baumeister bzw. Architekt (*muhandis* - *me'mār*) war in erster Linie Ingenieur. Ein richtig, d. h. den Gleichgewichtsgesetzen entsprechend erbautes Gebäude verfügt über eine proportionale Entsprechung und Einheit seiner Teile sowie über eine harmonische Kompositionslösung. Letztere wurde jedoch nicht durch statische Berechnung im modernen Sinne<sup>533</sup> erreicht, sondern durch Erfahrungsstatik<sup>534</sup>.

Die verschiedenen Methoden statischer Untersuchung von Gebäuden gehen von einer *strukturellen Analyse*<sup>535</sup> aus, einem Prozess, in welchem der Ingenieur festlegt, wie ein Gebäude konstruiert werden muss und detailliert ausarbeitet, ob es der Einwirkung von Lasten standhalten wird<sup>536</sup>. Die Methode wurde von HEYMAN und MAINSTONE entwickelt und von GYE an mittelalterlichen Bauten im Iran angewandt<sup>537</sup>. Dadurch wird verständlich, wie ein Bau die Belastung trägt und äußeren Einflüssen widersteht. Die Methode erlaubt es, den inneren Zusammenhang der Bestandteile der Gebäudestruktur sowie die empirischen und theoretischen Kenntnisse der antiken Erbauer zusammenfassend darzustellen.

Das grundlegende Moment dieser Methode besteht in der Aufgliederung der Gebäudestruktur in einzelne Bestandteile, die unabhängig voneinander betrachtet werden. Die Aufgliederung wird dadurch begründet, dass sich Teile des Baus unter der Einwirkung von Lasten unterschiedlich verhalten<sup>538</sup>. Überdies müssen die Belastungen, die auf Gewölbe und Gesamtbauwerk einwirken, berücksichtigt und untersucht werden.

### *Ständige Lasten*

Ein Großteil der getragenen Last ist das Eigengewicht des Gebäudes. Es ist konstant und wird in der Statik als "ständige Last" bezeichnet. Gewölbe tragen ihr eigenes Gewicht und die Last der Dachdecke oder der Fußbodenkonstruktion des Obergeschosses. Deshalb wurden sie so geplant, dass sie in der Lage sind, mindestens die doppelte Last zu tragen. Die ständige Last wird in statischen Berechnungen als senkrechte Auflast berücksichtigt.

<sup>528</sup> KURRER 1997: 87-114. Der Autor liefert eine historische Darstellung der statischen Analyse von Steingewölben in Europa für die vergangenen 400 Jahre; siehe angegebene Literatur. PIPPARD u. a. 1936: 281-306.

<sup>529</sup> БАЧИНСКИЙ 1949; ИСРАИЛОВ, ГОЛЬДЕНШТЕЙН 1984: 14-18.

<sup>530</sup> ВОРОНИН 1950: 14.

<sup>531</sup> ЗАСЫПКИН 1961; ВОРОНИНА 1953a.

<sup>532</sup> АСАНОВ 1971: 68-69; ВОРОНИНА 1979: 83-86; БАЙМАТОВА 1994: 41-50.

<sup>533</sup> Z. V. SUIDA 1954; FLÜGGE 1962; DOME 1971: 81-115.

<sup>534</sup> БРЕТАНИЦКИЙ 1973: 88-92; БУЛАТОВ 1978: 38-40; СМОЛИНА 1990: 194-207.

<sup>535</sup> Strukturelle Analyse hier hat nichts mit dem linguistischen Terminus "strukturelle Analyse" gemein.

<sup>536</sup> GYE 1988: 129.

<sup>537</sup> HEYMAN 1968: 177-188; MAINSTONE 1973: 131-137; 1975; GYE 1988: 129-144.

<sup>538</sup> ИСРАИЛОВ, ГОЛЬДЕНШТЕЙН 1984: 15-17; GYE 1988: 129. Ausgehend von diesem Prinzip beschreibt ВОРОНИНА die Bautechnik des antiken Chorezmien und unterteilt das Material in drei Hauptgruppen 1) Substruktionen, 2) Wände, 3) Gewölbe. Eine solche Untergliederung ist charakteristisch für viele Arbeiten, die die Konstruktionen von Gebäuden und ihrer Bestandteile untersuchen. - ВОРОНИНА 1952: 87-104; ПРИЫТКИНА 1973.

### Verkehrslasten

Auf den Bau wirken temporäre Lasten ein - der Wind, atmosphärische Niederschläge, das Gewicht von Personen usw. In der Statik wird diese Belastung als Verkehrslast bezeichnet. Wegen ihrer flüchtigen Einwirkungsdauer und ihrem geringen Gewicht wurden sie nur bei der Errichtung hoher Bauten (Türme, Minarette) und tragender Strukturen (Brücken, Aquädukte) berücksichtigt. Bei statischen Berechnungen von überdachenden Wölbungen wird die Verkehrslast meist vernachlässigt. Die Windbelastung wird als horizontal gerichtet aufgefasst.

### Seismische Kräfte

Als seismische Kräfte werden die durch Erdbeben auftretenden Belastungen, die auf das Gebäude einwirken, verstanden. Seismische Wellen wirken folgendermaßen<sup>539</sup>: **1)** als Stoß bei schweren Erdbeben, **2)** als Schwankungen bei mittleren Erdbeben und **3)** als Vibrationen bei schwachen Erdbeben. Dadurch kommt es zu vertikalen und horizontalen Belastungen, die das konstruktive Gefüge des Gewölbebaus auf Dauer verändern können<sup>540</sup>.

Bei vertikalen Wellen erleidet das Gebäude lediglich eine Überlastung in der gewohnten Ausrichtung, bei horizontalen Wellen dagegen verändert sich das Verhalten der Bestandteile des Gebäudes. Im letzteren Fall beginnt das Material auf Abscherung und nicht nur auf Druck, Dehnung und Verbiegung hin zu arbeiten. Die Zuverlässigkeit des Ziegels und besonders des Mörtels ist bei Scherung wesentlich geringer als bei Druck, so dass eine Verschiebung der Gebäudeteile erfolgt<sup>541</sup>.

Wahrscheinlich ist für die Bestimmung des Verhaltens der Konstruktionen unter Einwirkung solcher Belastungen die Analyse nur in einem speziellem statischen Zustand unzureichend. Alte Gebäude wurden nicht nur unter Berücksichtigung der Kräfte, die "von oben nach unten" wirken, geplant und gebaut, sondern auch mit Rücksicht auf Kräfte, die "von unten nach oben" und "seitwärts" gerichtet sind.

Die Ursache für die Standfestigkeit der Gewölbe auch unter der Einwirkung von Belastungen liegt zum großen Teil in der Lehmziegelbauweise selbst. Statisch betrachtet ist die wichtigste Eigenschaft von ungebranntem Ziegel in Lehmbauten die Übereinstimmung im Dehnverhalten von Ziegel und Mörtel<sup>542</sup>. Der Lehmziegel verfügt über quasi-elastische Eigenschaften, da unter der Belastung die Skelettstruktur des Lehms nicht verletzt wird.

Mit Elastizität und Plastizität des Mauerwerks reagiert das Gewölbe auf seismische Einwirkungen<sup>543</sup>. Eine mit Lehm- und Gipsmörtel errichtete Wölbung wird im Unterschied zu einer mit Kalkmörtel gemauerten Steinwölbung nicht starr. Gips kann ebenso wie Lehm Feuchtigkeit wieder aufnehmen und wird weich, plastisch und zäh<sup>544</sup>. Beide Mörtelarten sind deformierbar und erfüllen wichtige Stabilitätsanforderungen bei Erdbeben. Das Geheimnis der Standfestigkeit mittelasiatischer Wölbungen liegt also in der ausgeglichenen Wechselbeziehung von Ziegel und Mörtel.

Auf die Materialabhängigkeit des statischen Zustands eines Gebäudes verweist ASANOV<sup>545</sup>. Die unterschiedliche Qualität des Baumaterials und die aus ökonomischen Gründen partielle Anwendung von Materialien mit geringerer Festigkeit sowie die Errichtung einzelner Gebäudeteile nacheinander führen zu einer ungleichmäßigen Verteilung von Lasten. So wird eine Disharmonie der inneren Kräfte erzeugt und in der Folge auch die Gebäudestatik komplizierter.

## 4.2 Grundformen der Wölbtechnik

In Mittelasien werden seit dem 4. - 3. Jt. v. Chr. bis in die Gegenwart zwei Wölbtechniken angewandt: Kragwölbung und Radialwölbung, wobei die erste eine Wölbtechnik ohne Schub (**Abb. 14/1-3**) und die zweite eine Wölbtechnik mit Schub darstellt (**Abb. 14/4-15**). "Klassische Beispiele", die Kragwölbung, die Radialwölbung im Kufverband und die Ringschichtenwölbung wurden bereits im Hinblick auf ihre Statik untersucht<sup>546</sup>. Zusätzlich werden an dieser Stelle die Ausführungsarten bei mittelasiatischen Bauten bis zur sog. modifizierten Wölbung<sup>547</sup> dargestellt. Aus der Sicht der Statik werden zum ersten Mal die Wölbungen aus Tragkomponenten wie Dreiecksgewölbe, trapezförmige bzw. sprengwerkförmige Wölbungen und Gewölbe aus Sonderziegel unterschieden. Das Verhalten unter Last wird der Einfachheit halber an Tonnengewölben gezeigt.

<sup>539</sup> ЗАСЫПКИН 1930: 71.

<sup>540</sup> АСАНОВ 1973: 20; ИСРАИЛОВ, ГОЛЬДЕНШТЕЙН 1984: 15.

<sup>541</sup> ФРУМКИНА 1991: 94.

<sup>542</sup> АСАНОВ 1970: 29; 1973: 19; ГҮЕ 1988: 130.

<sup>543</sup> ФРУМКИНА 1991: 94.

<sup>544</sup> ЗАСЫПКИН 1928b: 311-312.

<sup>545</sup> АСАНОВ 1970: 28; Sein Urteil betrifft mittelalterliche Gebäude aus gebranntem Ziegel, kann aber dessen ungeachtet in gewissem Maße auch den realen Zustand von Lehmziegelgebäuden illustrieren.

<sup>546</sup> HEINRICH 1957-1971: 324-325; ПУГАЧЕНКОВА 1958b: 227; ЗАСЫПКИН 1961: 148; JONES, MICHELL 1972: 14-16, Abb. 3; REUTHER 1973: 255; СЕЈКА 1978: Kap. 2, 33-36; КОТТМАНН 1981: 269; ГҮЕ 1988: 131.

<sup>547</sup> Diesen Begriff führte СHМЕЛНИЗКИ ein (persönliche Mitteilung bei einem Gespräch von 1998). Vom ferganischen Baumeister Ustā Jusuf Ali wird eine solche Wölbung als *hiyābān* bezeichnet. - ПИСАРЧИК 1954: 232-233, Abb. 3.; Definition der Wölbtechnik siehe im Textteil, Punkt 5.3.1 Radialgewölbe in Kufverband, S. 143-145ff.

#### 4.2.1 Wölbtechnik ohne seitlichen Schub: Kragwölbung

Streng genommen entstehen nur dann keine nach außen schiebenden Kräfte, wenn jede Schicht des Mauerwerks jeweils nur soweit über die darunterliegende vortritt - vorkragt - dass der gemeinsame Schwerpunkt der vorkragenden Teile noch innerhalb der tragenden Mauer liegt (**Abb. 14/1-3**). Das kann bei Kragwölbungen aus sehr langen Steinblöcken zutreffen. Aber bei größeren Spannweiten besteht immer die Gefahr des Abkippen der oberen Teile. Soweit das nicht die Verzahnung des Mauerverbandes verhindert, hilft ein vorübergehendes Abstützen, bis sich die Gewölbehälften im Scheitel aneinander lehnen können. Dadurch entsteht ein geringer Schub, den jedoch der Reibungswiderstand der aufeinanderliegenden Blöcke neutralisiert. Dasselbe wird durch schwere Abdeckplatten erreicht<sup>548</sup>. In Kragkuppeln bilden die Schichten horizontale Druckringe, die dem Abkippen zusätzlich entgegenwirken<sup>549</sup>.

Bei Gewölben aus Ziegeln verschärft sich naturgemäß das Problem wegen deren geringen Längen, die den Schwerpunkt schnell vor die Tragwandkante vortreten lassen. Andererseits erleichtert die Haftfähigkeit des Mörtels, die enge Verzahnung des Verbandes und das vergleichsweise geringe Gewicht des Ziegels die Arbeit. Ist das Gewölbe geschlossen, ist es bei vertikaler Belastung ohne weitere Maßnahmen standsicher. Die temporäre Einwirkung eines Erdbebenstoßes kann den Einsturz des Scheitels, jedoch nicht des gesamten Gewölbes bewirken.

Errichtet man ein Tonnengewölbe allein aus horizontal vorkragenden Ziegelschichten, nimmt die Gesamthöhe des Gebäudes beträchtlich zu, wie dies bei den Türöffnungen von Talaşkan-Tepe 1 (**Taf. 17**)<sup>550</sup> oder dem überwölbten Korridor von Pşak-Tepe (**Taf. 14 a**)<sup>551</sup> deutlich wird. War dies nicht erwünscht, beließ man, wie bei den Grabkuppeln in Geoksjur (**Taf. 1 b**)<sup>552</sup>, im oberen Teil eine Öffnung. Um die Stabilität der oberen, überstehenden Ziegelschichten zu gewährleisten, baute man in der Raummitte einen Stützpfeiler, ersichtlich am Beispiel der Töpferöfen von Namazga-Tepe (**Taf. 5 b, c**)<sup>553</sup>, oder man errichtete eine hufeisenförmige Kuppelschale mit einer Öffnung im Scheitel. Diese Variante demonstriert ein Töpferofen von Džinn-Tepe (**Taf. 48 b**)<sup>554</sup>. Sollte ein steiler Anstieg der Kuppel erzielt werden, verlegte man die rechteckigen Ziegel mit der Kurzseite nach innen, im umgekehrten Fall ringsum als Läufer. Die vertikale Auflast in der Wölbschale wird stufenweise abgeleitet. Allerdings sind die Ziegel der Grabkuppeln von Geoksjur nicht nur in geschlossenen Ringen verlegt, sondern zusätzlich in spiralförmig aufsteigenden Ringen<sup>555</sup>. Dies bewirkt eine Veränderung der Neigung der Ringe mit dem Ziel einer fließenden Lastableitung in die Tragwand.

#### 4.2.2 Wölbtechnik mit seitlichem Schub: Radialwölbung

Seitlicher Schub oder schräger Auflagerdruck entsteht, wenn die Wölbziegel geneigt angeordnet werden und sich gegenseitig abstützen. Auf diese Weise entsteht in der Schale eine Kraft, die darauf ausgerichtet ist, die Tragwände auseinander zu schieben (**Abb. 15/1, 4**). Alle Gewölbe dieser Art werden hier unter dem Begriff Radialgewölbe zusammengefaßt (**Abb. 14/4-15**). Dabei richten sich die Fugen zwischen den Ziegeln auf einen bzw. mehrere Mittelpunkte auf der Kämpferlinie oder auf der Symmetrieachse des Gewölbes<sup>556</sup>. Die notwendige Keilform wird entweder durch keilförmige Fugen oder durch entsprechend hergerichtete Ziegel erreicht. Die Innenfläche der Schale ist als Gewölbeleibung (*intradós*), die Außenfläche als Gewölberücken (*extradós*) zu bezeichnen. Stärke und Höhe sowie Stabilität und Tragfähigkeit der Radialgewölbe hängen von der Spannweite, dem Wölbprofil und der Ausführung der Schale ab.

Ein schuberzeugendes Gewölbe kann aus Ziegeln oder Rippen gewöhnlicher (regelmäßiger) und besonderer (unregelmäßiger) Form bestehen. Letztere sind tragende Komponente; können in einem Dreieck- bzw. Viereckverband oder auch im Sonderverband gemauert werden. Das bedeutet, dass die Druck-, Zug- und Scherkräfte in der Schale aufgespaltet und hauptsächlich durch die Verknüpfung von Tragkomponenten wirksam sind. Daher stehen diese Wölbungen den vektoraktiven und schnittaktiven Tragwerken nahe<sup>557</sup>, in denen die Kräfte entweder innerhalb des Trägers, d. h. des Vektors (von lat. *vector*), oder innerhalb des Trägerquerschnitts aktiv sind und einen kooperativen Spannungszustand erzeugen.

In Gewölben, die im Querschnitt aus mehr als drei Ziegeln oder Rippen bestehen, wird der Druck von einem Ziegel zum anderen beinahe senkrecht weitergegeben und dann in das umgebende Mauerwerk abgeleitet (**Abb. 15/1, 4, 5-7**). Wenn der Gewölbequerschnitt aus zwei Ziegeln/Rippen besteht bzw. dreieckig ist (**Abb. 14/4, 5, 7**), setzt die vertikale Belastung sie unter Druck, den sie unmittelbar auf die Auflager ableiten.

<sup>548</sup> HEINRICH 1957-1971: 324; JONES, MICHELL 1972: 16, Abb. 3iv.

<sup>549</sup> HART 1965: 22; KOTTMANN 1981: 269.

<sup>550</sup> ШАЙДУЛЛАЕВ 1990: 12, 43-58.

<sup>551</sup> АСКАРОВ 1982: 30-41.

<sup>552</sup> САРИАНИДИ 1965a: 14-19.

<sup>553</sup> КУФТИН 1956: 277-278, Abb. 4, 6-8.

<sup>554</sup> МЕРЕЖИН 1962: 12-40.

<sup>555</sup> САРИАНИДИ, КОШЕЛЕНКО 1966: 87.

<sup>556</sup> HEINRICH 1957-1971: 395.

<sup>557</sup> Siehe ENGEL 1999: 17, 50-51.

### *Wölbkomponente im Dreieckverband*

Gerade oder segmentförmige Lehmziegel und Rippen bilden verbandartig eine Schale, die wie ein "Dreigelenkbogen"<sup>558</sup> mit zwei Fußgelenken in den Auflagern und einem Gelenk im Scheitel funktioniert (**Abb. 14/4, 5, 7**)<sup>559</sup>. In einem "Dreigelenkbogen" sind zwei Lehmziegel oder Rippen miteinander frei beweglich verbunden. Gelenke übertragen keine Biegemomente<sup>560</sup>.

Einfachste Dreiecksgewölbe aus zwei Ziegeln haben eine unterschiedliche Höhe in Abhängigkeit von ihrer Tiefe und ihrer Spannweite (**Abb. 14/4**). Die Schubkräfte verlaufen schräg nach außen. Die margianischen Gewölbe dieser Art stammen aus dem 3. - 2. Jt. v. Chr. (Jassy-Tepe, dritter Feuertempel in Gonur Nord)<sup>561</sup> und aus dem 4. - 6. Jh. n. Chr. (*sanghārāma* in Gjaur-Kala<sup>562</sup>). Die Spannweite von 0,5 bis 0,9 m wurde mit rechteckigen Ziegeln überwölbt, die mit den Breit- oder Kurzseiten gegeneinander geneigt wurden. Mitunter wurden die Ziegel in mehreren Schichten verlegt.

Die Lehmrippen mit einer Länge von 0,88 bis 2,2 m und einem Querschnitt um 20 x 10 cm hatten mitunter die Form eines *linga*<sup>563</sup> genannten Segments (**Abb. 14/7**). Die Wölbungen über Raum 2/2 A im Zentral-Tempel und Rampe im West-Tempel Nush-i Džan, in der Befestigungsanlage von Persepolis, im Treppenhaus (Bau IV) und Raum 1 (Bau VI), sowie über Rampe (Bau VII) in Shahr-i Qumis (8. Jh. v. Chr. - 4. Jh. n.)<sup>564</sup> mit einer Spannweite von 0,9-3,6 m bestanden aus zwei Rippen im Querschnitt. Diese stoßen im Scheitel des Gewölbes aufeinander. Der Schub verläuft hier in den Kreissegmentbogen.

### *Wölbkomponente im Viereckverband*

Bei trapezförmigen bzw. sprengwerkförmigen Wölbungen wird der Scheitelstein beiderseits von gekanteten Ziegeln oder von Rippen zangenartig eingespannt (**Abb. 14/12, 15/2**). Der horizontale Scheitelstein wirkt wie ein übliches Stab und erzeugt senkrecht gerichtete Stützkraft. Diese wird in die Mauer jedoch durch schräg ausgesteifte Ziegeln, schräg umgeleitet. Die Form der drei bogenförmigen Lehmrippen in den Wölbungen über Raum 5 im Bau VII Shahr-i Qumis, und über Korridoren des unteren Feuertempels in Kūh-e Ch<sup>w</sup>āgā<sup>565</sup>, sind den Bogenkräften angepasst. Gegen auftretende Biegespannungen wurden sie mit Schilfrohren bewahrt. Die Fugen im Auflager und Widerlager erlauben solcher Schale die Druck- und Zugkräfte leicht umzulenken. Die Konstruktion ist offensichtlich durch die Form der Rippen bzw. Wölbschale starr. Der Scheitelstein gilt als wichtiges Bestandteil der Schale, da sein Wegfall zur Änderung statischer Verhältnisse und sogar zur Zerstörung ganzer Gewölbe führt. Er versucht immer nach unten zu rutschen, deshalb ist beim Wölben eine zeitweilige Lehre erforderlich<sup>566</sup>.

Die älteste Gewölbe aus drei Lehmziegeln über Nischen und Öffnungen der Gräber 256, 1300, 1745 und 1750 in der Gonur Nekropole (3. - 2. Jt. v. Chr.)<sup>567</sup> sowie über Töpferöfen 4 und 6 in Togolok 1 (2. Jt. v. Chr.) besitzen eine Spannweite von 0,42 bis 1,3 m (**Taf. 10 a, b; 9 a, b; Abb. 15/2**). Die Stärke der Tonnenschalen entspricht der des Ziegels. Zwischen den Ziegeln in den einzelnen Wölbsegmenten entsteht kein Fugenwechsel. Die Wölbsegmente in der Tonne der Öfen 4 und 6 bilden den Urtyp geneigter und flacher Ringschichten<sup>568</sup>.

### *Wölbkomponente im Sonderverband*

In nordbaktrischen Gewölben aus dem 1. - 3. Jh. n. Chr. mit einer Spannweite um 0,72-0,8 m wurden Schablonenziegel mit Halbkreisausschnitten in den Maßen 68 x 47 x 12,5 x 4-5 cm verwendet (**Abb. 14/6**)<sup>569</sup>. Zwei solche Ziegel über die Treppe der Zelle in Ajrtam lehnen sich gegeneinander und bilden ein Einfeldrahmen mit drei Gelenken (**Taf. 55**)<sup>570</sup>. Auf die Ziegel-Rahmen wirken Druck- und Zugkräfte im Trägerquerschnitt im

<sup>558</sup> ЛАХТИН 1911: 63; HERGET 1993: 91.

<sup>559</sup> Die gleiche Form weisen vorgefertigte Steinrippen auf, die Portalbögen in den Grabmalen von Darja Khan und Mirza Sulayman islamischer Zeit bilden (**Abb. 16/2, 3**). - Vgl. ZEJADACZ-HASTENRATH 1990-91: 247-280. Sie belegen eine Kontinuität in der Verwendung solcher Wölbelemente in den benachbarten Gebieten von Baktrien und Gandhara. Für einige nordsyrischen Tonnenbauten wurden ebenso bogenförmig gehauene Steinplatten verwendet. - ЇЕЈКА 1978: Kap. 2, 29-30, Abb. 18-19.

<sup>560</sup> ЛАХТИН 1911: 63; ФРУМКИНА 1991: 94.

<sup>561</sup> Als zusätzliches Beispiel sind hier die Töpferöfen von Šahdad zu erwähnen; vgl. HAKEMI 1997: 43.

<sup>562</sup> PUGACHENKOVA, USMANOVA 1995: 52, Abb. 3.

<sup>563</sup> Mit den Worten *linga* (sogd.) und *linga-i gavri* bezeichnen die Baumeister Mittelasiens das Wölbprofil (**Abb. 34/1, 2**) und den als Lehre freistehenden Gipsbogen. - ПИСАРЧИК 1954: 282, 285, 287; РЕМПЕЛЬ 1982: 180ff. *Linga* weist mehrere etymologische Bedeutungen auf, eine von ihnen entspricht der Rippe bzw. dem Rippen-Segment. - Siehe dazu БАЙМАТОВА 2001b: 295-306.

<sup>564</sup> HANSMAN, STRONACH 1970: 38, 44, 50, Abb. 4, 7, 10; HERRMANN 1977: 37; HUFF 1990: 145-160, Abb. 2, 3, 6, 7, 10; Taf. 24/1, 25/2-3; 26/1-2.

<sup>565</sup> HANSMAN, STRONACH 1974: 13, Abb. 2; HUFF 1990: 151, Abb. 8; Taf. 25/1.

<sup>566</sup> ПУГАЧЕНКОВА 1958b: 227.

<sup>567</sup> САРИАНИДИ 2001: 25, 27, 29, 31, Abb. 7з, 8в, 8и, 9.

<sup>568</sup> Ausführlicher dazu siehe den Textteil, Punkt 5.3.2 Ringschichtengewölbe, S. 146ff.

<sup>569</sup> Diese Ziegel sind bei HUFF etwas ungeschickt als Rippenelemente bezeichnet. - Vgl. HUFF 1990: 154, Fn. 22. Ähnliche Form weisen Steinblöcke auf, die Portalbögen in Masčidi Sangi bilden (**Abb. 16/1**) (SCARCIA, TADDEI 1973: 89-109). Siehe auch den Textteil, Kap. 3.6.1.4 Formate und Verlegen von Lehmziegeln: Ziegel in ungewöhnlicher Form, S. 83.

<sup>570</sup> Die Technik, die hier bei der Ziegelverlegung verwendet wurde, ist laut PUGACHENKOVA eine Ringschichtentechnik (ПУГАЧЕНКОВА 1979: 28). Anlass für diese Zuordnung war offensichtlich die hochkante Stellung der Ziegel. Sie berichtete ebenfalls über den Fund ähnlicher

Verein mit Scherkräften zusammen. Die Ziegel widerstehen der Kräftewirkung dank ihrer platten Form, Gleichartigkeit und Festigkeit des gebrannten Lehms. Infolge Durchbiegung wird ein inneres Drehmoment aktiviert, das das äußere Drehmoment im Gleichgewicht hält<sup>571</sup>.

#### 4.2.3 Kombination von Krag- und Radialwölbung

Kragschichten treten häufig in der Kämpferzone des Gewölbes auf, während der Wölbscheitel radial gemauert ist (**Abb. 15/4** links). So errichtete man z. B. die Gewölbe im Gebirgsvorland im unteren Teil vorkragend. Die Anzahl der Kragschichten hing vom Anstieg des Gewölbes ab und schwankte zwischen 5 und 15 Schichten. In Gewölben mit einer Spannweite zwischen 3 und 9 m wurden mehrere Kragschichten stufenweise zusammengefaßt<sup>572</sup>. Dadurch ergab sich für die untere Gewölbezone eine bandartige Gliederung, die sogenannte Zäsur (Wohnbauten in Alt-Pendžikent<sup>573</sup>, Čilchudžra in Ustrušana<sup>574</sup>).

Nach VORONINA war der untere Teil des Gewölbes vorgekragt, um: **1)** die Spannweite zu verringern; **2)** dort den Wölbvortrag selbst zu erleichtern; **3)** die Standfestigkeit insgesamt zu erhöhen<sup>575</sup>. Zu ergänzen ist m. E., dass ein auskragender unterer Teil häufig in Tonnengewölben anzutreffen ist, die zwei oder mehrere parallel angeordnete Räume überspannen. Ein solches Vorgehen ermöglicht es, die Stützfläche zu verbreitern und die Gewölbefüße auseinander zu rücken (Tešik-Tepe<sup>576</sup>, Alt-Pendžikent<sup>577</sup> u. a.). In diesen Fällen sind die inneren Tragmauern schwächer als die äußeren.

#### 4.3 Analyse der Tonnengewölbe unter statischen Aspekten

Die statische Analyse erfolgt am einfachsten am Tonnengewölbe. Dabei werden Bögen ebenfalls als Tonnengewölbe betrachtet, da sich beide Formen nur durch ihre Tiefe unterscheiden (**Abb. 15/1-7**).

Besonders anschaulich ist es, die Analyse an der Bruchverformung des Gewölbes anzusetzen. Ursache des Bruchs können die Einwirkung von Niederschlägen oder von Erdbeben oder auch eine falsche Form und eine mangelbehaftete Konstruktion des Gewölbes sein<sup>578</sup>. Nicht zu übersehen ist eine jeweils dabei entstehende falsche Belastung des Gewölbes.

All dies kann zur Folge haben, dass sich die Schale deformiert, sich ein Gewölbeteil dreht und über den anderen rutscht. Durch Verschiebung der Tragmauern gegeneinander entstehen Risse und Spalten in der Schale, die deren kritischen Zonen anzeigen (**Abb. 17/1**). Statisch gesehen sind das "Gelenke", in denen sich die dazwischen liegenden Wölbsegmente frei bewegen und ausweichen können. Extrem starke Bewegungen führen zum Bruch der Schale.

##### 4.3.1 Stützlinie und "ideale" Form der Gewölbeschale

Das Stützlinienverfahren ist eine Methode der graphischen Statik, also eine geometrischen Konstruktion. Dabei wird der Gewölbequerschnitt mit einer (beliebigen) Anzahl von Wölbsteinen aufgezeichnet. Als Bogen von z. B. einem Meter Tiefe gedacht, lassen sich die Gewichte der Steine und der darauf ruhenden, sich nach den Seiten steigernden Lasten berechnen und als Kräfte in Strecken darstellen. Eine geometrische Seileckkonstruktion, die hier nicht beschrieben werden soll, markiert im Querschnitt die Mittellinie für die Druckspannungen, die sog. Drucklinie (*line of pressure*)<sup>579</sup>. Deren Schnittpunkte mit den Fugen sind die eigentlichen Stützpunkte, und ihre Verbindung ergibt die Stützlinie (*line of resistance*)<sup>580</sup>.

Um die Stützlinie ermitteln zu können muss man Form und Belastung des Gewölbes kennen. In einfachsten Fall rechnet man nur mit ständiger, gegebenenfalls auch umweltbedingter Last. Der moderne Ingenieur verknüpft graphische und mathematische Methoden miteinander und bestimmt die genaue Stützlinie. Für unsere Analyse genügen jedoch typische Formen von Stützlinien.

Bei gleichmäßig verteilter Belastung ist die Stützlinie parabelförmig (**Abb. 18/1**)<sup>581</sup>. In halbkreisförmigen und in angenähert halbkreisförmigen Gewölben verläuft die Stützlinie im Scheitel und in der Kämpferzone nahe am Gewölberücken, in der Zone dazwischen nähert sie sich der Gewölbeleibung (**Abb. 18/2**). In hohen spitzbogigen Gewölben wird die Stützlinie ebenfalls spitzbogig und nähert sich im Scheitel und am Auflager der inneren Gewölbeleibung, in der Zone dazwischen dem Gewölberücken (**Abb. 18/3**). In flachen Gewölben wird die

---

Ziegel in den parthischen Bauten von Nisa, die für Bögen bestimmt waren. - ПУГАЧЕНКОВА 1949: 208. Der Form nach identische Steinplatten bilden den Portalbogen der mittelalterlichen Masčidi Sangi in Larvand (Afghanistan). - Vgl. SCARCIA, TADDEI 1973: 89-109.

<sup>571</sup> ENGEL 1999: 50-51, 171, 187.

<sup>572</sup> ВОРОНИНА 1953a: 17, 24.

<sup>573</sup> ВОРОНИНА 1964: 51-87, Abb. 2, 6.

<sup>574</sup> ПУЛАТОВ 1975: 16, 19, 21, Abb. 10-14, 17, 18, 54.

<sup>575</sup> ВОРОНИНА 1953a: 17.

<sup>576</sup> НИЛЬСЕН 1966: 246.

<sup>577</sup> РАСПОПОВА 1990: 136, Abb. 41.

<sup>578</sup> АСАНОВ 1971: 53-59; ИСРАИЛОВ, ГОЛЬДЕНШТЕЙН 1984: 14-15; ПУГАЧЕНКОВА 1998: 9.

<sup>579</sup> ЗАСЫПКИН 1961: 147; KURRER 1997: 99, 108; ENGEL 1999: 245.

<sup>580</sup> HENKEL 1929: 135ff.

<sup>581</sup> JONES, MICHELL 1972: 15, Abb. 3iii; GYE 1988: 136.

Stützlinie flach und nähert sich im Scheitel dem Gewölberücken und am Auflager der inneren Gewölbeleibung (**Abb. 18/4**)<sup>582</sup>.

Was im Laufe der Jahrtausende mit dem Gebäude geschah, ist oftmals unbekannt. Zu bestimmen, welche Form die Last hatte, die vom Gewölbe getragen wurde, ist anhand der erhaltenen Überreste so gut wie unmöglich. Darauf kann jedoch m. E. nach die Form der Wölbung bzw. ihrer Stützlinie selbst hinweisen. Bei statischen Berechnungen wird sie gewöhnlich als über die gesamte Oberfläche des Gewölbes verteilt angenommen (**Abb. 19/1**). In der Realität kam es vermutlich oft zu ungleicher Lastverteilung. Bei auf die Mitte zunehmender Last verformt sich auch beim halbkreisförmigen Gewölbe die Stützlinie zum Spitzbogen (**Abb. 19/2**). Ist die Last über den Seitenteilen des Gewölbes höher als in der Mitte, nähert sich ihre Form einer niedrigen oder im Scheitel gedrückten Ellipse (**Abb. 19/3**). Bei einer Einzellast wird die Stützlinie asymmetrisch verformt (**Abb. 19/4**).

Wenn die Schale die Form der Stützlinie genau einhält, dann kann sie sehr dünn ausgebildet sein. GYE behauptet, dass früher die exakte Anpassung der Form in der Realität unmöglich war<sup>583</sup>. Es genügt aber aus Sicht der Statiker, wenn die Stützlinie im mittleren Drittel des Schalenquerschnitts verbleibt (**Abb. 18/2, 3**).

Das Herausreten der Stützlinie aus dem mittleren Drittel weist auf eine ungleichmäßige Spannung im Gewölbe hin, d. h. darauf, dass einige Teile des Gewölbes übermäßig komprimiert, andere hingegen gedehnt werden. Der Theorie der ungleichmäßigen Kompression gemäß präzisiert LACHTIN, dass der Durchstoßpunkt der Stützlinie sich am Schnittpunkt im mittleren Drittel eines Gewölbesteins befinden muss, damit der gesamte Schnitt nur der Kompression unterworfen ist<sup>584</sup>.

Im anderen Fall entstehen auf der Gegenseite der Stützlinie Zugspannungen, die das Schalenmauerwerk nicht aufnehmen kann. Dadurch kommt es zu klaffenden Fugen, die als Gelenke wirken und zum Bruch führen können. Gefährdet ist stets der Scheitel und meist auch der Gewölberücken im unteren Drittel.

#### 4.3.2 Das Widerlager

Da die alten Baumeister die Bruchzonen ihrer Gewölbe kannten, am Scheitel aber nichts ändern konnten, sicherten sie den Gewölberücken im unteren Drittel ab. Sie hintermauerten entweder die Gewölbeschale massiv oder/und bildeten die innere Gewölbeleibung mittels vorkragenden oder leicht geneigten Ziegelschichten aus (Junusabader Ak-Tepe, Munčak-Tepe u. a.) (**Abb. 18/5, 6; Taf. 94 d, e**). Ob es dabei zu einer regelgerechten Ausbildung eines Widerlagers kam bleibt offen.

Für die sasanidische Zeit beschreibt CHOISY zwei Methoden, die Radialwölbung auf die Auflager aufzusetzen<sup>585</sup>. Bei der einen werden die untersten Schichten über dem Auflager horizontal vorgekragt und entsprechend des Wölbprofils abgerundet. In einer bestimmten Höhe werden sie dann zu einer radial liegenden Ebene abgeschrägt, auf die sich die Radialschichten stützen (**Abb. 18/5**). Bei der anderen Methode erhalten die untersten Schichten über dem Auflager eine allmählich zunehmende Neigung und gehen fließend in die eigentlichen Radialschichten über (**Abb. 18/6**).

Aus Sicht der Gewölbestatik handelt es sich in beiden Fällen um die Konstruktion von Widerlagern, auf welche der schräge Schub der Radialschichten lotrecht trifft und ganz oder annähernd in die Vertikale umgeleitet wird, wenn hier genügend Masse dem Schub entgegenwirkt. Die Vorkragung oder Vorrundung vergrößert die Masse und verkürzt zudem die Spannweite des schiebenden oberen Gewölbeteils.

Grundsätzlich müssen die Funktionen von Auflager und Widerlager unterschieden werden. Im Normalfall liegt das Widerlager höher als das Auflager, auf dem das Gewölbe steht oder ansetzt. Die Widerlagerhöhe ergibt sich aus dem theoretisch oder nach Erfahrungswerten ermittelten Bereich. Für in etwa halbkreisförmige Gewölbe ist ein geometrisches Verfahren bekannt, um die Höhe und Neigung des Widerlagers zu bestimmen: eine unter 30° durch den Mittelpunkt auf der Kämpferlinie geführte Radiale gibt beides an und markiert zugleich die kritische Zone, in welcher sich die Stützlinie der Innenfläche der Schale nähert und der Gewölberücken zum Ausbeulen neigt (**Abb. 17/1; 24/1**)<sup>586</sup>. Dem ist am einfachsten durch Mauermasse zu begegnen.

Beobachtungen an mittelasiatischen Gewölben weisen darauf hin, dass dort entsprechend verfahren wurde. Denn in der entsprechenden Ebene ändert sich die Ausführungstechnik. Nach ZASYPKIN wird bei Backsteingewölben der untere Teil in einem anderen Verband als der Scheitelbereich gemauert. VORONINA vermutet, dass bei Lehmziegelgewölben diese Ebene durch den Gleitwinkel des Materials bis 36° bestimmt wird<sup>587</sup>.

#### 4.3.3 Besondere Stabilisierungsmassnahmen

Um auch unter Erdbebenbedingungen die Stabilität der Tonnen zu garantieren, beachteten die Baumeister, dass ein steiler Anstieg des Wölbprofils in Tonnengewölben die Vertikalkomponente der Druckkräfte in der Schale verstärkt<sup>588</sup>. Nach VORONINA verringern massive Schultern des Gewölbes den Schub<sup>589</sup>.

<sup>582</sup> ЛАХТИН 1911: 63-64; АСАНОВ 1971: 60-64.

<sup>583</sup> ГYE 1988: 134.

<sup>584</sup> ЛАХТИН 1911: 61-62.

<sup>585</sup> ШУАЗИ 1937, II: 94-95.

<sup>586</sup> ЛАХТИН 1911: 63; НАРТ 1965: 16ff.; SCHMID 1980: 85-86.

<sup>587</sup> ЗАСЫПКИН 1961: 148; ВОРОНИНА 1979: 74.

<sup>588</sup> АСАНОВ 1971: 61-62.

<sup>589</sup> ВОРОНИНА 1979: 74.

Das Gewölbe gewann an Stabilität, wenn auf die Tragwand unter der Schale eine nachgiebige bandartige Zäsur eingemauert wurde, die in regelmäßigem Läufer-, Binder- oder fischgrätförmigem Verband verlegt war (**Abb. 20/1-5**). Diese trennte Schale und Tragwand und erlaubte ihnen, unabhängig voneinander zu arbeiten<sup>590</sup>. Die Ziegelzäsur verringert die Einwirkung der vertikalen seismischen Kräfte auf das Gewölbe und ermöglicht es, die Erdstöße gleichmäßig auf der Mauerkrone zu verteilen<sup>591</sup>. Besonders effektiv war der Fischgratverband, der es gestattete, vertikale und horizontale Kräfte umzulenken (**Abb. 20/1-3**). Dabei wirkt die Kraft, die parallel zur Lagerfuge des Ziegels verläuft, der Kohäsion entgegen (**Abb. 20/6**)<sup>592</sup>.

Flache Gewölbe reagieren auf eine Verschiebung der Tragwände sehr empfindlich, und deren kleinste Bewegung nach außen kann eine Senkung des Scheitels zur Folge haben<sup>593</sup>. Aus diesem Grund müssen abgeflachte und niedrige Gewölbe starke Widerlager haben.

Die gemeinsame Stützwand wird zwischen den bereits parallel errichteten Tonnengewölben ab Kämpferhöhe zurückgesetzt aufgemauert. In diesem Fall belastet die Masse des Mauerwerks zusätzlich die Tragwände der Gewölbe und lenkt den schrägen Kämpferdruck nach unten (Toprak-Kala, Alt-Pendžikent<sup>594</sup>).

Radialgewölbe setzen der Dehnung durch ausweichende Tragwände nur schwachen Widerstand entgegen. Als Folge ergeben sich Risse und Verformungen.

Im Normalfall, d. h. bei kleinen und mittleren Spannweiten, sind die Tonnenschalen einen Ziegel stark gemauert. Bei Tonnen und Bögen kommen aber auch zwei Schalen übereinander vor (**Taf. 22 c, 24 d**). Die obere Schale diente wahrscheinlich der Entlastung und schwächte den Druck der darüberliegenden Gebäudeteile auf die untere Schale ab<sup>595</sup>. Die Schalen konnten entweder vom Auflager bis zum Scheitel in ein und derselben Wölbtechnik oder aber vom Auflager bis zum Widerlager und von da bis zum Scheitel in unterschiedlichen Wölbtechniken gemauert werden.

Beide Schalen in der gleichen Wölbtechnik findet man in Tonnengewölben mit abgerundet-halbkreisförmiger und elliptischer Form. Abgerundete, hoch- und niedrigelliptische Schalen in zweischaligen Tonnen wurden zumeist in Ring- und Radialschichten errichtet.

Die Kombination von Ring- und Radialschichten war nicht zufällig (**Abb. 27/4**). Da die geneigten Ringschichten in den unteren Tonnenschalen durch Mörtel miteinander verbunden waren, verliefen ihre Lagerfugen durchgehend in Querrichtung. Die oberen, aus Radialschichten bestehenden Schalen besitzen jedoch durchgängig Fugen in Längsrichtung der Tonnen. Die Übereinanderlagerung zweier Schalen, in denen der Verband zwischen den Lehmziegeln in entgegengesetzter Richtung verläuft, verleiht der Tonne besondere Tragfähigkeit<sup>596</sup>.

In der Theorie betrachtet man normalerweise die Wölbschalen als aus gleichen Wölbelementen und in gleicher Wölbtechnik errichtet. Die Mehrzahl der Gewölbe wurde allerdings in einer Kombination aus mindestens zwei Wölbtechniken gemauert. Letzteres modifizierte das Profil des Gewölbes und die Richtung der Schubkräfte in seinem Körper.

Um die horizontalen Schubkräfte abzuleiten, wandten die Baumeister unterschiedliche Methoden an (**Abb. 21/1-3**). Sie vergrößerten das Gewicht des Gewölbes im unteren Teil oder errichteten über seiner Widerlagerzone Sekundärtonnen im Zwickelbereich (Adžina-Tepe). Die Schultern wurden massiv bis zum Niveau von 30-50° gemauert.

Die in der unteren Ebene befindlichen Gewölbe der Zitadelle Baba-ata sind innerhalb der Ziegelplattform errichtet worden (**Taf. 113 b**). Sie trugen die Last der Gebäude der oberen Etage. Die Besonderheiten ihres Wölbverbandes können in diesem Zusammenhang leider nur anhand von Zeichnungen beurteilt werden. Eine spezielle Vorrichtung in Kala-i Bolo schützt die Gewölbeschale im Korridor vor dem Druck der Außenwand innerhalb der Plattform<sup>597</sup>. Etwa 70 cm oberhalb der Kämpferhöhe sind längslaufende Hölzer im äußeren Zwickel verlegt (**Abb. 21/5**).

Die Verwendung hölzerner Zuganker in der Widerlagerzone des Gewölbes genügt nicht immer ästhetischen Ansprüchen (**Abb. 21/4**). Allerdings heben sich die horizontalen Schubkräfte bei der Verbindung der gewölbtragenden Stützen mit Zugankern auf. Solche in bestimmten Intervallen verlegte Ankerbalken halten die Tragwände von Gewölbe beispielsweise in Alt-Pendžikent, Čilchudžra, Toštemir-Tepe zusammen.

#### 4.3.4 Schlussfolgerungen

Das Tonnengewölbe erzeugt einen Schub, der aus Komponenten zusammengesetzt ist, die nach außen (horizontal) und nach unten (vertikal) gerichtet sind. Die Größe der Komponenten, aus denen sich der Kämpferdruck zusammensetzt, ist der Gesamtlast proportional.

<sup>590</sup> ФРУМКИНА 1991: 94.

<sup>591</sup> ВОРОНИНА 1964: 74, Abb. 19.

<sup>592</sup> ФРУМКИНА 1991: 97, Abb. 5-6. Der Fischgratverband fand breite Anwendung in den Wänden und Trompen mittelalterlicher Denkmäler, so im Mausoleum Koš-Gumbez - ТОЛСТОВ 1958: 30-31, Abb. 9 - und Dev-Kesken - ПУГАЧЕНКОВА 1963b: 125-136, Abb. 16; in der Basis der Kreiskuppeln des Gebäudes II (Runinengruppe 49) in Sīstān - FISCHER 1976, I: 114, Abb. LII.

<sup>593</sup> GYE 1988: 138-139; KURRER 1997: 95-96.

<sup>594</sup> ВОРОНИНА 1953a: 20, Abb. 17, 18.

<sup>595</sup> Analog hierzu ist der Entlastungsbogen zu erwähnen, dazu vgl. ЛАХТИН 1911: 3.

<sup>596</sup> ТОЛСТОВ 1953: 164; ЛАПЕРОВ-СКОБЛО 1967: 289-290.

<sup>597</sup> ДАВИДОВИЧ, ЛИТВИНСКИЙ 1955: 73, 89; ДАВИДОВИЧ 1958: 99.

Die Fähigkeit des Tonnengewölbes, eine Auflast zu tragen, hängt nicht von seinen absoluten Maßen ab, sondern von seiner Form und davon, wie Wölbprofil und Lasten zueinander ins Verhältnis gesetzt sind.

Nach GYE ist die optimale Form des Gewölbes bei gleichmäßiger Belastung annähernd halbrund und nicht spitzbogig<sup>598</sup>.

Ein Gewölbe kann trotz Rissen standfest sein. Die Mehrzahl der Tonnengewölbe kann beachtliche Zerrbewegungen aushalten. Sie können durch Verlagerung und durch Hinzufügen von Lasten zerstört werden.

#### 4.4 Analyse der Kuppelgewölbe unter statischen Aspekten

Für Kuppelgewölben lässt sich eine "ideale Form" nicht so einfach wie für Tonnengewölben ermitteln. Die Kräfteverhältnisse in Kuppelschalen sind kompliziert. Kuppeln sind nach der üblichen Auffassung geschlossene Gewölbe. Sie lassen sich unterscheiden in Kreiskuppeln (Rotation-Kuppel: *čarhi*<sup>599</sup>) und in sogenannte vierteilige Kuppelgewölbe (*čār tark*)<sup>600</sup>, wie Trompengewölbe (*balhī*) und Klostergewölbe (*čār-sipar*)<sup>601</sup>, dessen Spielarten Mulden- und Spiegelgewölbe sowie das aus Bögen und Schalen zusammengesetzte Kuppelgewölbe.

##### 4.4.1 Form und Stärke

Die genaue ursprüngliche Form von Kuppeln ist häufig nur schwer zu bestimmen, da bei allen Denkmälern die Scheitel der Kuppeln verlorengegangen sind. Eine Kuppel erscheint in jeder Schnittebene als Tonnengewölbe, ist jedoch ein allseitig gekrümmtes Gewölbe. Zeichnerisch dokumentierte Reste von Kreiskuppeln erlauben allerdings annäherungsweise von einer hohen und einer niedrigen Ellipse zu sprechen, von einer Parabel oder einem Sphärokonus. Die Form der Kappe und der Stich der vierteiligen Kuppelgewölbe ist mit Ausnahme der aus Bögen und Schalen zusammengesetzten Kuppeln ebenfalls rekonstruierbar.

##### *Kreiskuppeln*

Die kreisförmige Kuppel beliebigen Profils kann geometrisch als mehr oder weniger exakter Rotationskörper angesehen werden (**Abb. 23/1-3**). Als Ausgangsmodelle dienten dabei halbsphärische, konische sowie sphärokonische Kuppeln und Kuppeln niedrigen Anstiegs<sup>602</sup>.

Die Grundfläche der Kreiskuppel wird, soweit sie nicht über einem Rundraum errichtet ist (**Taf. 81 b**), entsprechend der Grundrissform des Unterbaus annähernd abgerundet oder bleibt kreisrund (**Taf. 98 b, 128 b**). Als dritte Lösung werden Hilfswölbungen - Trompen - über den Ecken errichtet, die entweder in die Kuppelschale selbst (**Abb. 23/2**) oder in eine Übergangszone zwischen Unterbau und Schale eingelassen sind (**Abb. 23/1, 3**). Trompen sind "als ein auf 90° geöffneter halber Hohlkegel oder Trichter"<sup>603</sup> anzusprechen, der die Last der innerhalb der Ecke aufsteigende Kuppelteile aufnimmt und auf die Tragwand ableitet<sup>604</sup>.

Ingenieure schlagen in der Regel verschiedene Methoden zur Berechnung von Kreiskuppeln vor. Bei seinem Vergleich gelangte ASANOV zu dem Schluß, dass die geeignetste Methode für Ziegelkuppeln die Berechnung nach der sog. *nichtmomentanen* Theorie ist<sup>605</sup>. Diese Methode gewährleiste, ungeachtet einer Reihe von Abweichungen, wie der starren Verankerung des Kuppelfusses, der Abnahme der Schalenstärke zum Scheitel hin oder der Lichtöffnungen, einen optimalen Zusammenfall der theoretischen Größe der Kräfte mit den vorhandenen Deformationen. Eine Methode, nach der die Kuppel berechnet wird, als bestünde sie aus einzelnen Radialbögen (**Abb. 24/1**)<sup>606</sup>, hält er für gänzlich ungeeignet, da sie nicht die in der Realität vorhandenen horizontalen Druck- und Zugkräfte berücksichtige.

Bei der Bestimmung der Form des verlorengegangenen Kuppelscheitels einer Kreiskuppel gingen die Ingenieure von den allgemeinen statischen Prinzipien der Funktion der Schale aus. Mittelasiatische Kuppeln dieser Art sind im Scheitel etwas konisch (**Abb. 19/5-7**). Für eine solche Kuppel beträgt die Stärke der Schale 3% ihrer Spannweite. Innerhalb dieser Stärke verläuft gewöhnlich die Stützlinie der Kuppel. Bei einer Drehung der Stützlinie um die Achse erhält man die ideale Form der Kuppel. Beträgt die Stärke der Kuppel weniger als 3% der Spannweite, so ist die Schale nicht standsicher. Eine halbsphärische Kuppel mit einer Höhe von weniger als

<sup>598</sup> GYE 1988: 140.

<sup>599</sup> ПИСАРЧИК 1954: 278.

<sup>600</sup> Die mittelasiatische Baumeister bezeichnen vierteilige Gewölbe als Kuppel - *gumbaz* bzw. *gunbad-i čār tark*. - ПИСАРЧИК 1954: 280-281 mit Abb. Deshalb werden sie in diese Arbeit als Kuppelgewölbe betrachtet.

<sup>601</sup> *Čār-sipar* abgeleitet von *čār-i spar* - siehe РЕМПЕЛЬ 1982: 187 - bedeutet wörtlich "vier Schilde, Tafeln/Platten bzw. Schirme", hier: Wangen.

<sup>602</sup> АСАНОВ 1971: 61-64; GYE 1988: 141-142.

<sup>603</sup> RAVE 1951: 97; JONES, MICHELL 1972: 12, 13, Abb. 7b, 7d. Die Trompen werden in der Fachliteratur als "scheiben- oder muschelförmiges Blatt bzw. Gewölbe sowie Vorsetzblatt" - GRÜNWEDEL 1909: 29, 84; LE COQ 1926: 42, Fn. 1; bzw. "Trompe aus perspektivischen Bögen" - ВОРОНИНА 1953a: 22, und als "perspektivische Trompe" bezeichnet - ПУГАЧЕНКОВА 1958b: 232.

<sup>604</sup> Eine interessante Diskussion über die Bestimmung der Trompen und Pendentifs wurde in AARP geführt - JONES, MICHELL 1972: 9-25, wo MAINSTONE vorschlug, die strukturelle Funktion und im Anschluß daran ihre äußere Form und die Technik des Mauerverbandes zur Definitionsgrundlage zu machen. - Siehe MAINSTONE 1973: 131-137 mit Abb.

<sup>605</sup> АСАНОВ 1971: 60.

<sup>606</sup> Bei GYE heißen diese Bögen "Apfelsinensegmente". - Vgl. GYE 1988: 140, Abb. 14. Diese Methode kann nach ASANOV nur dann angewendet werden, wenn die Kuppel tatsächlich von vertikalen Nähten zerschnitten wird, d. h. eine Faltenkuppel ist. - Vgl. АСАНОВ 1971: 60.



25% der Spannweite kann theoretisch die geringste Stärke haben und dabei standfest bleiben (**Abb. 19/8**)<sup>607</sup>. Die konische Form der Kuppel gilt als die stabilste (**Abb. 19/5**)<sup>608</sup>.

#### *Vierteilige Kuppelgewölbe*

Die Höhenlinien bei vierteiligen Kuppeln zeigen einen harmonischen Übergang vom Quadrat zum Kreis, wie es bei pneumatischen, gespannten Kuppeln über quadratischem Grundriss der Fall ist<sup>609</sup> (**Abb. 25/1-3**).

Das Trompengewölbe *balhī* besteht aus vier trompenförmigen Schalen und einer Kalotte (**Abb. 25/1; Taf. 45 c, d**). Es ruht über einem viereckigen Grundriss und ist von niedrigem oder hohem Stich. Sein Wölbprofil ist im Achsenkreuz nicht identisch mit der Krümmung der Diagonalen. Theoretisch muss die Höhe den Achsen- und den diagonalen Wölbprofilen entsprechen. Die Stärke der Kuppelschale wird durchgehend nach der Ziegellänge bemessen. Bei einer Spannweite von ca. 9 m in Dilberdžin (Baktrien) beträgt sie 2,25%.<sup>610</sup>

Das Klostergewölbe *čār-sipar* besteht aus vier gekrümmten Wangen, die über den rechtwinkligen Ecken des Raumes beim Aufeinandertreffen eine Kehle bilden (**Abb. 25/2; Taf. 103 e**). Sein Wölbprofil ist abhängig davon, ob es einen quadratischen oder einen rechteckigen Raum überwölbt, in den Achsen gleich oder in Längs- und Querachsen unterschiedlich weit ist. Die erhaltenen Überreste über den Räumen 4 und 5 in Groß Kyz-Kala (Merv)<sup>611</sup> zeugen von einer großen Höhe der Kuppelgewölbe. Offensichtlich hatte die Kuppel mit einer Stärke von 51-52 cm über Raum 4 eine Kappe ähnlich einem Mulden- oder Spiegelgewölbe<sup>612</sup>. Die Kuppelgewölbe von Raum 5 mit einer Stärke von 17-18 cm<sup>613</sup> sahen wie ein Klostergewölbe über einem geschlossenen Auflager aus.

Die aus halbelliptischen Bögen und zwischen sie gesetzten Schalen bestehende Kuppel des überdachten Raums 9 des Schlosses Baraktam 1 ist in tragende und füllende Bestandteile aufgegliedert (**Abb. 25/3; Taf. 74 a, b**)<sup>614</sup>. Die Bogenstärke nimmt stufenförmig nach oben ab, d. h. sie beträgt unten zwei (80 cm), dann eineinhalb (60 cm) und oben einen Ziegel (40 cm). Die rekonstruierte Stärke der Wölbseite beträgt einen Ziegel.

#### 4.4.2 Kräfteverlauf in Kuppelgewölben

##### *Kreisförmige Kuppelgewölbe*

Die kompliziertere statische Wirkungsweise der Kuppelgewölbe ergibt sich aus ihrer Form als allseitig gekrümmte und damit räumliche Tragwerke, bei denen die Kräfte nach allen Richtungen abfließen und sich in Meridianen und Breitenkreisen überlagern<sup>615</sup>. Das sei an einer halbkugeligen Kuppel veranschaulicht (**Abb. 24/3**). Um sich den Kräfteverlauf in Meridianrichtung vorzustellen, zerlegt man gedanklich die Kuppelschale in sich nach oben verjüngende Bogenpaare (**Abb. 24/1**). Die Stützlinie entspricht dann der im Tonnengewölbe. Solange sie innerhalb der Schale bleibt, treten nur Druckspannungen auf. Im Scheitel wird die Stützlinie wegen des sich verringernden Gewichts aber auch noch bei Überlastung innerhalb verbleiben, wenn sie unten schon austritt und im Gewölberücken Zugspannungen entstehen. Schließt man in diesem Zustand gedanklich die Bogenpaare wieder zur Kuppel zusammen, so lässt sich vorstellen, dass ein Teil der Kräfte in die horizontalen Ringe abfließt und dort Ringspannungen erzeugt. Dadurch stabilisiert sich die Kuppel trotz der Überlast wieder. Steigert man diese, bis am Gewölberücken wieder Zugspannungen entstehen, bleiben im Scheitel immer noch Ringdruckspannungen. Diese verringern sich nach unten kontinuierlich bis auf Null und gehen dann in Zugkräfte über, falls sie nicht durch besondere Maßnahmen neutralisiert werden (**Abb. 24/2**).

In konischen Kuppeln wirken die Druckkräfte wie auch die Ringkräfte in Meridianrichtung immer komprimierend. Sie nehmen vom Kuppelfuß zum Scheitel hin gleichmäßig ab (**Abb. 19/5**), bis sie am Scheitel gleich Null sind. Die Verteilung der Kompressionsspannungen ist einem linearen oder beinahe linearen Prinzip unterworfen (d. h. die Spannungen in der Kuppelschale wirken entlang einer Strecke im Vergleich zu punktuellen oder Flächenspannungen bzw. Volumenspannungen)<sup>616</sup>.

Bei sphärokonischen Kuppeln unterscheidet man einfache und komplizierte, auch als gespitzt bezeichnete (**Abb. 19/6, 7**). In einfachen Kuppeln dieser Art verringern sich mit Zunahme der Krümmung des Wölbprofils die Druckringkräfte manchmal bis auf Null; es können jedoch geringe Dehnungsspannungen entstehen. In komplizierten Kuppeln ist der Übergang von Druckringkräften zu Zugkräften um so abrupt, je steiler die Krümmung über dem Kämpfer ist. In diesem Fall vergrößert sich auch der absolute Wert der Zugkraft in der am meisten gebogenen Zone<sup>617</sup>.

<sup>607</sup> GYE 1988: 142.

<sup>608</sup> АСАНОВ 1971: 61.

<sup>609</sup> Vgl. OTTO 1966, I: 58-64.

<sup>610</sup> Berechnet nach der Methode von GYE. - Vgl. GYE 1988: 142.

<sup>611</sup> HERRMANN 1999: 57-58, Abb. 52, 181, 182.

<sup>612</sup> Das Muldengewölbe ist aus einem Tonnengewölbe entstanden, dessen Schmalseiten durch Wangen geschlossen sind. Ein Muldengewölbe mit einer ebenen Fläche anstelle des Scheitels heißt Spiegelgewölbe. - KOEPF 1985 (1974): 177, 271, Abb. 15-16.

<sup>613</sup> Die Stärke wurde anhand einer Aufnahme bestimmt - HERRMANN 1999: 57, Abb. 52. Auf dem Gewölberücken war eine Flachsicht aus Ziegeln verlegt worden, so dass die Gesamtstärke zwischen 25 und 26 cm betrug.

<sup>614</sup> Siehe Kat. Nr. 32 Baraktam 1, S. 215; БАЙМАТОВА 2001a: 101-114 sowie den Textteil, Punkt 7.3.4 Die Ausbildung der Schalen beim zusammengesetzten Kuppelgewölbe, S. 198.

<sup>615</sup> АСАНОВ 1971: 62-63; HERGET 1993: 7; ENGEL 1999: 35.

<sup>616</sup> АСАНОВ 1971: 61-62.

<sup>617</sup> Ebenda.

Theoretisch ist der abgeflachte Scheitel der Kuppel als ein Teil zu betrachten, der bestrebt ist, nach innen zu fallen (**Abb. 24/2**). Jedoch ist die Stabilität von Kuppeln mit niedrigem Stich erwiesen, und sie tritt recht häufig auf<sup>618</sup>. Bemerkenswert ist, dass die Standfestigkeit von Kuppeln mit niedrigem Stich der von Bögen geringer Höhe ähnelt. Beide verhalten sich statisch beinahe analog. Allerdings ist eine niedrige Kuppel erheblich stabiler als höhenmäßig vergleichbare Bögen<sup>619</sup>.

#### *Vierteilige Kuppelgewölbe*

Die zusammengerückten Kegelhälften einer *balhī* - Kuppel (Trompengewölbe) bilden eine im Grundriss quadratische Grundfläche für die Kuppelkappe (**Abb. 25/1, 36/1**). Das Quadrat zwischen den Halbkegeln ist sphärisch geschlossen. In der Realität bilden die Seiten Halbkreise (im Fuß des Kegels). Die Konstruktion *balhī* ist für erdbebengefährdete Gebiete besonders geeignet, da sich die Schalen im Achsenkreuz verzahnen<sup>620</sup>. Die Verzahnung zwischen den Halbkegeln bewirkt vermutlich eine besondere, verbesserte Stabilität. Auch wenn der Scheitel des Gewölbes nach innen absinkt, bleiben die vier Halbkegel stehen. Die gleichmäßige Verteilung der Belastung auf die Stützfläche erlaubt dünnere umlaufende Tragwände<sup>621</sup>. Der Schubkraft des Trompengewölbes mit großer Spannweite in Dilberdžin wurde vermutlich auch von dem Tonnengewölbe des umgebenden Korridors aufgenommen (**Taf. 45 e**).

In Groß Kyz-Kala werden Raum 4 (7 x 4,8m) und Raum 5 (5,35 x 4,93 m)<sup>622</sup> von Kuppelgewölben *čār-sipar* (Klostergewölbe) überspannt, die aus vier Wangen bestehen (**Abb. 25/2; Taf. 103 a, e**). Vermutlich erreicht die Spannung in *čār-sipar* ihr Maximum in der Eckzone. Wie das spätere Jakkiper bei Merv (11. - 12. Jh. n. Chr.) zeigt, wurden die Eckteile des Klostergewölbes verstärkt. Offensichtlich wurde diese Zone als besonders gefährdet angesehen<sup>623</sup>.

Die einander überschneidenden Bögen der zusammengesetzten Kuppel im Raum 9 von Baraktam 1 wurden ohne Verband zwischen ihren Ziegeln im Scheitel errichtet (**Abb. 25/3; Taf. 73 d**). Hierdurch wurde den Bögen gestattet, sich bei Schwingung des Fußes zu bewegen.

#### 4.4.3 Bruch des Kuppelgewölbes

Unabhängig von der Form beginnt der Bruch der Kuppel am Scheitel, da er den größten Schwankungen von Temperatur und Niederschlägen ausgesetzt ist. Die Niederschläge führen zur Schwächung der Festigkeit des Mörtels und dadurch zur Zerstörung des Ziegelverbandes<sup>624</sup>. Auf die Kuppel wirken außerdem seismische Kräfte ein. Je höher die Schale sitzt, desto länger wirken seismische Schwankungen und die daraus resultierende Belastung des Scheitels nach<sup>625</sup>. Der Bruch beginnt also in den seismisch belasteten und exponierten Wölbteilen. Schließlich erfolgt der Bruch aufgrund zweier konkreter Vorgänge (**Abb. 24/2, 3**):

- 1) Infolge der plastischen Deformation in der Widerlagerzone sinkt der Scheitelteil ab. Dieser Prozess wird am "Aufblähen" der unteren Teile der Kuppel sichtbar.
- 2) Beim Auseinandergehen von Tragmauern ist der Wölbverband in den am meisten gekrümmten Breitenkreisen der unteren Kuppelteil auf Dauer nicht in der Lage, der Zugkraft zu widerstehen, was zu einem Aufreißen in dieser Zone führt.

#### 4.4.4 Die Übergangszone zwischen Raum und Kuppel

##### *Kreisförmige Kuppelgewölbe*

Kreisförmigen Kuppelgewölben entsprechen naturgemäß kreisförmige Raumgrundrisse. Soll aber eine Kreiskuppel über einem quadratischen oder annähernd quadratischen Raum errichtet werden, ist eine tragfähige Übergangszone nötig, die in Mittelasien mit Trompen<sup>626</sup> über den Raumecken geschaffen wird. Dabei sind zwei Lösungen möglich:

- 1 Die Ecktrompen schneiden in die Kuppelschale ein, die sich nur in den Raumachsen direkt auf die Mitten der Tragwände stützt (**Abb. 23/2; Taf. 98 e**).
- 2 Die Ecktrompen schneiden in einen zylindrischen Mauerring ein, auf den sich dann die ganze Kuppel stützt (**Abb. 23/1; Taf. 83 a**)<sup>627</sup>. Die Übergangszone kann je nach Raumgrundriss verformt werden und einem Rechteck mit gerundeten Ecken nahekommen oder zum Oval werden.

<sup>618</sup> Z. B. die bekuppelte Gruft des Mausoleums von Imam Šafi; siehe ДЖЕПБАРОВ, МУРАДОВ 1999: 150-152, Abb. 23, 25.

<sup>619</sup> GYE 1988: 142.

<sup>620</sup> DIEZ 1917 (1915): 78-79.

<sup>621</sup> ЗАСЫПКИН 1961: 150-152; НОТКИН 1965: 114.

<sup>622</sup> HERRMANN 1999: 141, Abb. 140.

<sup>623</sup> ПУГАЧЕНКОВА 1958a: 209-212 mit Abb.; 1958b: Abb. 36; HERRMANN 1999: 58, Abb. 51; HERRMANN irrt m. E. mit der Annahme, dass die Eckverdickungen nicht der Verstärkung, sondern der Unterstreichung der Form der Überwölbung dienen. Ähnliche Verdickungen wurden in der Schale vierteiliger Kuppeln *balhī* - vgl. ПИСАРЧИК 1954: 280, Abb. 29 - und in Kreiskuppeln - vgl. Kat. Nr. 43 Baba-ata, S. 318ff. - eingeführt. Damit wurden in vierteiligen Wölbungen der untere Teil und in Kreiskuppeln die Schale in Meridianrichtung verstärkt.

<sup>624</sup> АСАНОВ 1971: 63-64.

<sup>625</sup> ИСРАИЛОВ, ГОЛЬДЕНШТЕЙН 1984: 15.

<sup>626</sup> Definition siehe im Textteil, Punkt 4.4.1 Form und Stärke: *Kreiskuppeln*, S. 122.

<sup>627</sup> HART 1965: 14-15.

#### 4.4.5 Die Stabilität der Kuppel

##### *Kreisförmige Kuppelgewölbe*

Die Kreiskuppel - *čarhi* - wird intuitiv als strukturell vollkommene Form wahrgenommen. Dieses Gefühl, dem ästhetisch und spirituell Ausdruck verliehen wurde, findet seine reale Begründung in der Stabilität der Kuppel. Die Entsprechung zwischen Grundkreis der Kuppel und runder Form des überwölbten Raumes dient der größeren Stabilität der Wölbung bei der Einwirkung von Trägheitskräften. Wahrscheinlich setzte man deshalb Kuppeln mit großer Spannweite auf runde Räume auf (Rundsaal von Alt-Nisa, Rundraum von Kafyr-Kala, Brunnen, Öfen und Wehrtürme) (**Abb. 26/1, 2**).

Bei einer Kreiskuppel, die direkt auf der Mauer aufgesetzt ist, wird der untere Teil verstärkt. Bei der Kuppel, die mit einer Übergangszone errichtet ist, verstärkt man die Übergangszone. Dadurch wird eine höhere Stabilität erreicht (**Abb. 23/3**).

Die Stabilität der Kreiskuppel wurde durch allmähliche Veränderung der Zusammensetzung des Mörtels im Wölbverband vom Fuß bis hin zum Scheitel gesteigert<sup>628</sup>. Der schwere Lehmörtel wurde für den Wölbverband des unteren Teils der Kuppel bis zum Widerlager verwendet, der gemischte (Alabaster + Ton) – für den oberen<sup>629</sup>. Der Mörtel wurde dort gewechselt, wo die Ringe mit einer großen Neigung nach innen zu liegen kamen. Damit wurde das Gewicht der Kuppelschale stufenweise erleichtert.

Um das Gleichgewicht der Kuppel gegen Erdbeben zu garantieren, setzten die Baumeister einige Ziegelschichten in fischgrätzförmigem Verband in die Kuppelbasis zwischen den Trompen ein (vgl. Bus-i Nor in Nordiran<sup>630</sup>). Das gestattete vermutlich, vertikale und horizontale Kräfte beim Erdbeben umzuverteilen. Eine gleiche, nachgiebige Ziegelschicht trennte die Kuppelschale und Stützwand bei hochmittelalterlichen Kuppeln, wie im Falle des Mausoleums auf der Nekropole Baba-Ġamber (Dachistan), im Mausoleum Abu-Said in Mehana (Areia, Margiana), im Mausoleum Tekeš (Chorezmien) und im Ivan-Hofhaus II (östliche Kammer, Sīstān)<sup>631</sup>.

##### *Kreiskuppel innerhalb einer Plattform*

Dem Querschnitt der drei Etagen der Zitadelle Baba-ata<sup>632</sup> nach zu urteilen, waren die Kreiskuppeln so gedacht (**Taf. 113 b**), dass das Gewicht der obenliegenden Tragwände vom Scheitel des unteren Tonnengewölbes oder von den Tragmauern der untenliegenden Gewölbe oder vom Widerlager der unteren Kuppel getragen wurde. Dabei ist der Zwickel zwischen Tonnen und Kuppeln ebenso wie zwischen den Kuppeln der verschiedenen Geschosse nicht mit Ziegelschichten ausgefüllt, sondern vermutlich mit Bauschutt<sup>633</sup>. Offensichtlich erlaubte es die Spitzbogenform der Kuppeln und Tonnen einerseits und die ausgleichende Lehmausfüllung im Zwickel andererseits, die Baulasten der oberen Geschosse zu übertragen und zu verteilen.

##### *Vierteilige Kuppelgewölbe*

Die Kegelhälften des Kuppelgewölbes *balhī* in Dilberdžin sind bis zum Punkt der Vereinigung mit der Kappe selbständig (**Abb. 36/1; Taf. 46 a, b**). Die Last wird über die Halbkegel auf die Seiten des Vierecks abgeleitet. Über den Raumachsen verzahnen sich die Halbkegel und bilden Kehlen, in denen die Schubkräfte in die Vertikale umgeleitet werden. Gewöhnlich ist der Scheitel des *balhī* abgeflacht und von niedrigem Stich. Dem zerstörten oberen Teil der Kuppel nach zu urteilen, war der schwächste Punkt die Übergangszone von den Kegelhälften zum Scheitel (**Taf. 45 c**). Dort bilden die Kegelhälften ein sphärisches Quadrat, das als Kalotte eingewölbt wird. Diese belastet die Kegelflächen und die Mittelzonen des Unterbaus und kann komplett abrutschen, wenn sie nicht am Rand verstärkt wird.

Das Geheimnis der Stabilität des Klostergewölbes *čār-sipar* begründet sich offenbar in dessen recht hohen Stich (**Abb. 25/2; Taf. 103 e**). Die feste Verankerung des Kuppelfußes und das gegenseitige Abstützen der Wangen über den Mauerecken verlieh der Wölbung Stabilität, selbst wenn man im Scheitel eine Öffnung ließ. Die große Höhe erlaubt relative dünne Schalen.

Die Konstruktion der zusammengesetzten Kuppel über Raum 9 in Baraktam 1 besitzt eigene Vorteile, denn sie erlaubt leichte Kuppelschalen (**Abb. 25/3; Taf. 74 a, b**)<sup>634</sup>. Die nach unten zunehmende Stärke der Bogenfüsse und ihr Verband mit der Mauer des unteren Geschosses dienten zweifellos der Stabilität der Bögen ebenso wie ihre geometrische Form. Räumlich waren die Bögen miteinander durch die Eckschalen verbunden. Dadurch bewahrte die Kuppel ihre Stabilität selbst bei Erdbeben.

<sup>628</sup> Obwohl bei diesem Beispiel die Rede von der mittelalterlichen Kreiskuppel des Mausoleums Muhammad Chanap'ja im südlichen Turkmenistan ist, ist doch nicht auszuschließen, dass eine Veränderung der Mörtel auch im Altertum vorgenommen wurde, um so mehr, als sie beim Wölben der Kuppel aus Lehmziegeln festgestellt wurde; vgl. ПИЛЯВСКИЙ 1950: 112-114.

<sup>629</sup> Siehe den Textteil, Punkt 3.9.3 Gipsmörtel und Kombination mit Löbmörtel: *Die Kombination von Löß- und Gipsmörteln*, S. 102.

<sup>630</sup> Der Kuppelbau wird in die sasanidische Zeit datiert - vgl. STRZYGOWSKI 1930: 183, Abb. 171-172; siehe auch HERZFELD 1921: 160, Fn. 2.

<sup>631</sup> Vgl. ПУГАЧЕНКОВА 1951: 196, Abb. 2; 1958a: 274-275 mit Abb.; 1958b: 244-245, Abb. 37; ХМЕЛЬНИЦКИЙ 1996a, I: 201-202, Abb. 206; ПРИБЫТКОВА 1960: 251, КЛИНКOTT 1976: 114-117, Textabb. LII sowie FISCHER 1974, II: 131, Bild 225.

<sup>632</sup> АГЕЕВА 1962: 152, Abb. 30.

<sup>633</sup> Die Vermutung basiert auf veröffentlichten Skizzen und Bauzeichnungen, da im Text selbst Angaben über die Füllung fehlen.

<sup>634</sup> ПУГАЧЕНКОВА 1957: 78.

#### 4.4.6 Schlussfolgerungen

- 1) Eine Kuppel mit geringer Spannweite kann bei abgeflachter Scheitelkrümmung dünn und trotzdem standfest sein. Eine Kuppel mit größerer Spannweite kann eine minimale Stärke haben, wenn sie ein steiles Wölbprofil hat. Damit wird der Ausbruch im unteren Teil der Kuppel vermieden.
- 2) Im Scheitel von Kuppeln kann man Öffnungen belassen, wenn ein horizontaler Druckring angeordnet wird.
- 3) Die Kuppeln sind stabil, wenn sie symmetrisch zur Achse konstruiert und belastet sind.
- 4) Wenn Risse erheblich sind und asymmetrisch verlaufen, weisen sie auf eine gefährliche Verschiebung der Stützteile hin<sup>635</sup>.

#### 4.5 Zusammenfassung

Die wenigen Ingenieure, die die Konstruktionen mittelalterlicher Bauten in Mittelasien und im Iran untersucht haben, sind der Meinung, dass die Statik und die Gesetze, die dem Verhalten von Gewölben unter der Einwirkung von Lasten zugrunde liegen, den alten Meistern unbekannt waren. GYE beispielsweise bezweifelt im Zusammenhang seiner Ausführungen zur Stützlinie, die sich im mittleren Drittel des Gewölbeschnitts befinden muss, dass die Erbauer über solche Kenntnisse der Statik verfügten und ist der Auffassung, dass "*the practice actually arose from a misunderstanding of arch behaviour* (die Praxis auf dem Unverständnis des Verhaltens des Gewölbes beruht)"<sup>636</sup>.

Dagegen findet man bei CHOISY, der die Errungenschaften der Architektur des Orients hinsichtlich der Gewölbe sehr hoch schätzte, folgende Auffassung: es "liefert keine Architektur (mit Ausnahme der Gotik) eine derartig tiefgründige Analyse des Schubs in Gewölbekonstruktionen und geht scharfsinniger und eleganter damit um." ... "Während in den römischen Bauten die Stabilität mit Hilfe der trägen Masse erzielt wurde, so ist hier die Tonne oder Kuppel ein lebendiger, arbeitender Organismus."<sup>637</sup>

Die alten Meister arbeiteten die Konstruktion der Kuppeln und Tonnen bis ins letzte Detail aus, vervollkommneten dabei die Form der Wölbprofile und wählten verschiedene Typen des Wölbverbandes. Ihre Vielfalt und das durchdachte System der Kräfteableitung innerhalb des Baus zeugen m. E. von der Fähigkeit zur empirisch-statischen Analyse der strukturellen Sachverhalte beim Wölben.

---

<sup>635</sup> GYE 1988: 143-144.

<sup>636</sup> GYE 1988: 136.

<sup>637</sup> ШУАЗИ 1937, II: 102; CHOISY 1964, II.