

Untersuchungen über die materialtechnischen Aspekte des Altars Ex 27

Horst Nowack - Weyhe

I Einleitung

Über die literarkritischen und historischen Probleme des (Brandopfer)Altars Ex 27,1-8//38,1-8 möchte ich nicht handeln, vielmehr der Frage nachgehen, ob seine Herstellung möglich und ob er gebrauchstüchtig war. Die Debatte entzündet sich immer an der Frage nach der Widerstandsfähigkeit einer Bronzeplatte gegen die auftretenden Brandtemperaturen. Bei der Betrachtung der reinen Zahlen scheint Gewißheit darüber zu bestehen, daß der Altar nicht funktionsfähig war. Zu dicht liegen der Soliduspunkt der Bronze und die erreichbare Brandtemperatur zusammen. M. E. werden bei dieser Betrachtung die Materialeigenschaften unterschiedlicher Bronzen, die Wärmeleitfähigkeit des Metalls und insbesondere die Umweltbedingungen beim Betrieb nicht oder zu wenig berücksichtigt. Bei einem Feuer dieser Größenordnung müssen starke und kühlende Luftströme entstehen, die zu einer schnellen Ableitung der Plattenwärme führen müssen. Um diese Hypothese zu stützen oder zu widerlegen, habe ich experimentelle Untersuchungen durchgeführt, die zu überraschenden Ergebnissen geführt haben. In dieser Arbeit möchte ich die Ergebnisse mitteilen.

II Die Konstruktionsmaterialien des Altars

2.1 Das Akazienholz

Der Altar soll aus Akazienholz gefertigt werden, mit den Maßen: 5 Ellen lang, 5 Ellen breit und 3 Ellen hoch. Der Holzunterbau soll mit Erz überzogen werden (vgl. Ex 27,1,2).

Die Akazie gehört zur Familie der "Leguminosa", die heute vorwiegend in Australien beheimatet ist. Es gibt viele Arten, deren Gewicht pro m³ unterschiedlich ist. Welche Art zu jener Zeit im Libanon bzw. Palästina vorkam, ist nicht zu ermitteln.

Akazienholz ist ein Hartholz, dessen Festigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt abhängig ist. Bei 40% ist es weniger fest als bei 15% Feuchtigkeit. Das Holz ist rötlich-braun mit dunklen Streifen. Es ist hart, aber elastisch, und ist schwer zu bearbeiten. Es ist resistent gegen Holzkrankheiten. Seine Zündtemperatur liegt zwischen 300 und 310 Grad Celsius¹.

Die technischen Eigenschaften sind also für die Erstellung der Substruktur des Altars sehr gut geeignet.

III Die Feuerstelle

3.1 War die Herstellung einer solchen Metallplatte möglich?

In Ex 27 werden die Maße der Platte mit 5x5 Ellen angegeben. Wenn man die alte hebräische Elle mit 44,4cm annimmt, ergibt das eine Platte von 2.22x 2.22m und eine erforderliche Dicke von 10mm.

Dieses Objekt kann nur im "Herdguß" realisiert werden, egal ob der Guß in toto oder in einzelnen Stücken erfolgt; die entsprechenden Materialien und technischen Standards waren vorhanden. Zum Herdguß muß ein waagrechtes Formbett hergerichtet werden, in das der abzugießende Gegenstand, der Model, eingedrückt wird. Nach der Aushärtung des Formbetts wird der Model entfernt und der so entstandene Hohlraum mit flüssigem Metall direkt oder mit Hilfe von Zuläufen gefüllt. Voraussetzung ist immer die genaue waagrechte Ausrichtung des Formbettes. Der Herdguß ist schwierig, da die Platte gleichmäßig dick sein muß, um nicht durch die entstehende Wärmespannung zu zerspringen.

Trotz der Schwierigkeiten, die in der Zusammenschaltung und in dem gleichzeitigen Abstich mehrerer Schmelzöfen gelegen haben muß, halte ich den Guß einer Feuerplatte in toto oder in einzelnen Stücken in den gegebenen Maßen für möglich.

3.2 Welches Material kam zur Anwendung?

Als Gußmaterial kommt nur die Bronze infrage. Bronze ist eine Legierung von Kupfer und Zinn. Kupfer hat einen vergleichsweise sehr hohen Schmelzpunkt von 1083 Grad C., aber schlechte Gießeigenschaften; es ergibt einen porigen Guß, weil es im flüssigen Zustand Gase löst, die bei der Erstarrung wieder frei werden und die Poren verursachen. Legierungen mit Kupfer und anderen

¹ F. H. TITMUS, Commercial Timbres of the World. The Technical Press London. 4th Edition 1971, Copyright 1971 by F. H. Titmus 38.

Elementen ergeben sehr viel bessere Gießeigenschaften. Die Legierungselemente: Blei und besonders Zinn wirken als Schmelzpunktniedriger und Entgasungsmittel.

Die Din-Vorschrift 1705 schreibt die Zusammensetzung heutiger Schmuckbronzen vor:

Kupfer	Cu = 88-90%	Das Schmelzintervall, in dem
Zinn	Sn = 9-11%	die Legierung flüssig wird,
Blei	Pb = 1,9%	ist: 890-1050 Grad C.
Nickel	Ni = 2,0%	Härte nach Brinell: HB 100
Antimon	Sb = 0,2%	Dehnung: 18%
Eisen	Fe = 0,2%	Zugfestigkeit: 270 N.mm ²
Schwefel	S = 0,05%	Zerreißgrenze: 130 N.mm ²

Reine Metalle haben einen Schmelzpunkt, Legierungen haben ein Schmelzintervall. Das Schmelzintervall wird durch den Solidus- und Liquiduspunkt begrenzt. Am Soliduspunkt beginnt die Veränderung des Metallgefüges, am Liquiduspunkt ist die Gefügauflösung beendet, die Legierung ist flüssig.

Die Zusammensetzung der Bronzen der frühen Eisenzeit, deren Richtwerte auf Funden in Großbritannien und Irland beruhen, weisen ähnliche Daten auf:²

Kupfer	Cu = 84,95%	Die technischen Parameter
Zinn	Sn = 10%	der alten Bronzen sind den
Blei	Pb = 5%	modernen Formen ähnlich, nur
Arsen	As = 0,03%	dürfte das Schmelzintervall
Antimon	Sb = 0,01%	etwas tiefer gelegen haben.
Silber	Ag = 0,01%	

N. H. GADEGAARD³ publizierte Analysen von Bronzen aus dem mesopotamischen Raum, die teilweise einen wesentlich höheren Zinnanteil, nämlich 10-17% ausweisen, leider ohne die ebenso wichtigen Zuschlagelmente und Analyseobjekte zu benennen, und kommt zu einem Schmelzintervall von 755-1010°C.

Für Schmuckbronzen, bei denen es darauf ankommt, auch dünne und grazile Teile gut darzustellen, ist eine dünnflüssige Legierung natürlich ideal. Für andere Zwecke, wie Waffen, werden die Gießer entsprechend der Aufgabenstellung andere Legierungstypen zur Verfügung gehabt haben, die durch ihre Zu-

2 R. F. TYLEKOTTE, Metallurgy in Archeology, A prehistory of metallurgy of the British Isles, London (1962).

3 N. H. GADEGAARD, On the so-called Burnt Offering Altar in the OT, PEQ 110 (1978) 38.

schlagselemente und Bearbeitung ganz andere mechanische und metallurgische Eigenschaften haben konnten.

So berichtet H. H. COGHLAN⁴ über alte Bronzen folgende Daten:

Härte:	Cu mit 5% Sn	= HB 68
	gehämmert	= HB 176-186
	Cu mit 10% Sn	= HB 88
	gehämmert	= HB 228
Schmelztemperatur:	Bei 8% Sn	= 1020 Grad C.
	Bei 13% Sn	= 980 Grad C.
	Bei 25% Sn	= 800 Grad C.

Die Analysen des 3. und 4. Jahrtausends v. Chr. aus Mesopotamien weisen noch keine Zinngehalte aus, hingegen hohe Arsenanteile und Nickel.

z.B.: Kupfer	Cu = 94,88%
Eisen	Fe = 0,19%
Nickel	Ni = 2,14%
Silber	Ag = 0,02%
Arsen	As = 2,33%

Erst in der ägyptischen Spätzeit, ab ca 1080 v. Chr. findet RIEDERER⁵ in den Statuetten Zinngehalte von 1,12-14,73%.

Zur Beantwortung unserer Frage können wir also nicht mit letzter Sicherheit auf Analysen zurückgreifen, sondern bleiben auf vergleichende Werte angewiesen. In meiner Betrachtung gehe ich davon aus, daß die Legierung für den Plattenguß des Altars Ex 27 unseren heutigen Bronzen ähnlich war, im Schmelzintervall eher bei 850-1000 Grad C. gelegen hat.

3.3 Wie hoch ist die thermische Belastung?

Auf der Platte wird ein Feuer aus Akazien- und Zedernholz unterhalten, dessen maximale Brandtemperatur um 1000°C liegt und dessen Heizwert etwa 18390 kJ beträgt. Im Zentrum des Brandes wird die Temperatur unter 1000°C betragen haben, zur Peripherie hin um etwa 100-200°C, auf 900-800°C sinkend.

Ein die ganze Plattenfläche deckendes Feuer würde nach Meinung von HOLZINGER⁶ und NOTH⁷ zu einer völligen Zerstörung der hölzernen Subkonstruktion

4 H. H. COGHLAN, Notes on the Prehistoric Metallurgy of Copper and Bronze in the Old World, Occasional Paper on Technology 4, Ed. by T. K. Penniman and B. M. Blackwood, Oxford (1951) 44ff.

5 J. RIEDERER, Kunstwerke chemisch betrachtet, Materialien, Analysen, Altersbestimmungen, Berlin, New York, Heidelberg (1981) 31.

führen.

Betrachtet man die reinen Zahlen, dann muß es im Zentrum des Brandes bereits zu einer Schädigung des Metallgefüges kommen, so daß unter der gegebenen Annahme die Feuerplatte des Altars Ex 27 nicht funktionsfähig wäre.

IV Arbeitshypothese

4.1 Wärmeleitfähigkeit

Ich gehe davon aus, daß obige Annahme einige wichtige Parameter nicht genügend berücksichtigt, denn alle Metalle haben eine gute Wärmeleitfähigkeit, die bei Kupfer besonders gut, bei einer Bronzelegierung deutlich schlechter ist. Diese Wärmeleitfähigkeit sollte zu einer schnellen Wärmeableitung führen, zumal sich der Altar im Freien befindet und durch den Luftzug des Feuers eine zusätzliche Abkühlung der Platte erfolgen müßte. Bei einem Holzbrand kommt es weiter zu einer sehr unterschiedlichen Schichtung und schnell zu einer starken Aschebildung, die isolierend wirkt. So betrachtet, dürfte der Feuerbrand die Platte nicht bis zum Soliduspunkt erhitzen.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Wärmeübertragung auf die hölzernen Stützpfeiler, die bei einer Temperatur von 300-310°C an den Auflagepunkten zerstört würden. In der experimentellen Überprüfung soll sich diese Arbeitshypothese bestätigen oder als unrichtig erweisen.

4.2 Versuchsaufbau

Der Aufbau stellt eine verkleinerte Simulation des Altars Ex 27 dar. Die Feuerplatte ist wegen der hohen Kosten einer Bronzeplatte aus Eisen, mit fast gleicher Wärmeleitfähigkeit. Die Platte mit den Maßen 80x80cm und einer Dicke von 10mm ruht auf hölzernen Stützpfeilern in einer Höhe von 1m.

Die Platte ist im Kernbereich des Feuers mit Bohrungen versehen, um den Temperaturverlauf im Feuerkern und an der Plattenoberfläche abgreifen zu können. Gleichlaufend werden an der Plattenunterseite, im Abstand von 10cm, Ableitungspunkte angelegt, um die Temperatur an der Plattenunterseite und die Wärmeableitung und ihre Geschwindigkeit zu ermitteln. Der Temperatur-

6 H. HOLZINGER, Kurzer Handcommentar zum Alten Testament, Mose 2, Ed. K. Marti, Tübingen (1900) 131.

7 M. NOTH, Das Alte Testament Deutsch, 2 Mose, 2. Auflage, Göttingen (1951) 176.

abgriff erfolgt über eine Thermoelementeinheit Pt-Rh-Pt $\leftarrow -2\Omega - 0,193\Omega$, wobei es eine Grundtatsache der Meßtechnik ist, daß eine fehlerfreie Messung, besonders bei Oberflächentemperaturmessungen, kaum möglich ist, weil die Messungen meistens an einer Stelle mit starkem Temperaturgefälle von der Oberfläche in Richtung des umgebenden Mediums erfolgt und selbst schon das Meßelement eine Störung des Temperaturfeldes bewirken kann. Auch beeinträchtigenden freiliegende Drähte des Thermoelementes die Meßgenauigkeit.

Um diese Fehlerquellen zu minimieren, ist auf der Plattenunterseite im Bereich der Meßstellen eine 10mm starke, durchbohrte Metalleiste aufgeschweißt, durch deren Bohrungen der Fühler des Thermoelementes mit konstantem Druck an die Plattenunterseite angepreßt und über die Erweiterung des Temperaturfeldes um 10mm eine Störung durch die Luftkonvektion verringert werden kann.

Die innere Holztemperatur der Stützpfeiler wird mit einem Quecksilberthermometer, 0,3 cm unterhalb des Plattenauflagepunktes fest plaziert, ermittelt. Angestrebt wird eine Kerntemperatur von ca. 1000°C , was den Temperaturwerten eines Holzfeuers entspricht. Es werden drei Durchgänge zu je 2 und 4 h angesetzt. Die Durchschnittswerte werden in Diagrammen, getrennt nach Plattenoberfläche und plattenunterseitigen Meßpunkten, (römische Ziffern), dokumentiert. Im Säulendiagramm werden die erreichten absoluten Werte angegeben.

Zur Erzielung einer gleichmäßigen Temperatur werden verwendet: Degussa Holzkohlekissen, deren Kerntemperatur etwa 980°C beträgt. Das Material ist insofern ideal, als es der Holzbrandtemperatur entspricht, sich aber ungleich besser schichten läßt und somit eine gleichmäßige Wärmeabgabe ermöglicht. Die Umweltbedingungen sollen festgehalten werden. Im Experiment wird auch die etwas geringere Wärmeleitfähigkeit von Eisen gegenüber Bronze berücksichtigt.

4.3 Versuchsdurchführung und gewonnene Daten

Experiment I: Mittelwert von drei Durchgängen je 2h. Die Flächenbeladung der Platte deckt mit 3-4kg Material 45-50% der Plattenoberfläche. Nach 30 Minuten werden vom zentralen Meßpunkt der Oberseite I und II zum peripheren Meßpunkt III folgende Temperaturen gemessen:

Oberseite nach 30 Minuten		Differenz von I nach III
I	= 740	
II	= 760	100-120°C
III	= 640	
Holzstütze	= 60°C	
Unterseite nach 60 Minuten		Maximaltemperatur
I	= 340	
II	= 300	830°C
III	= 240°C	

Im weiteren Verlauf sinkt die Temperatur kontinuierlich, um nach 2h an einem unteren Punkt zu enden. Die Außenbedingungen waren mit einer Temperatur von 21-22°C und einem O-SO drehenden Wind 2-3 fast ideal.

Experiment II: Mittelwert von drei Durchgängen unter Maximalbelastung der Platte je 4h. Neu eingeführt wird der Meßpunkt IV, wie aus dem Diagramm des Experiment II ersichtlich.

Die Flächenbeladung der Platte deckt mit 9kg Material 80% der Plattenoberfläche bei einer Nachladung von 2kg. Wegen der stärkeren Beladung werden erst nach 105 Min. und nach weiterer Zuladung von 2kg Material nach 180 Min. folgende Werte erreicht:

Oberseite nach 105 Min.		Differenz von I nach IV
I	= 740	
III	= 520	70-220°C
IV	= 670°C	
Holzstütze	= 100°C	
Unterseite nach 45 Min.	Nach 210 Min.	Differenz
I	= 340	I = 360
III	= 300	III = 250
IV	= 280°C	IV = 280°C 60-80°C
Erreichte Maximaltemperatur = 780°C		

Im Temperaturverlauf machen sich Wind, Aschebildung und unterschiedliche Schichtung des Brennmaterials an den Meßpunkten durch einen unruhigen Temperaturverlauf bemerkbar. An den plattenunterseitigen Meßpunkten sehen wir eine bessere Wärmeverteilung, die sich durch einen glatten, an den einzelnen Meßpunkten aber differenzierten Temperaturverlauf auszeichnet. Die Temperatur in der Holzstütze steigt von 35°C auf 100°C an, um am Ende des Experiment II bei 70°C zu enden.

Die Außenbedingungen waren mit einer Temperatur von 26°C und einem W-SW drehenden Wind 2-3 ebenfalls ideal.

4.4 Ergebnisbesprechung

Die Ausgangsfrage war, ob eine Bronzeplatte gegen die auftretenden Brandtemperaturen eines Holzfeuers widerstandsfähig sein kann. Die Frage nach den materialtechnischen Eigenschaften von Legierungen mit unterschiedlichen Zinn- und Spurenelementanteilen kann für die Zeit des Altars Ex 27 nicht sicher beantwortet werden.

Die von N. H. GADEGAARD mitgeteilten Analysedaten früheisenzeitlicher Bronzen des mittleren Ostens und Palästinas können in ihrem breiten Spektrum von 10-17% Zinnanteilen als Anhaltspunkt dienen, sollten aber unter den von mir angeführten Variablen betrachtet werden. Zur Frage des Schmelzintervalls wird G. J. DAVIES⁸ angeführt, der bei einem Anteil von 10% Zinn das Schmelzintervall der Legierung zwischen 840-1010°C annimmt. In meiner Untersuchung gehe ich von einer Bronze mit einem Schmelzintervall von 850-1000°C und einem Zinnanteil von 10% aus.

In beiden Experimenten werden an der Plattenoberfläche die Kerntemperatur des Brennmaterials von 980°C nicht erreicht. Der absolute Maximalwert liegt bei 830°C, also unter dem angenommenen Soliduspunkt von 850°C. Vom Zentrum zur Peripherie hin werden erwartungsgemäß sinkende Temperaturen verzeichnet. Erstaunlich sind die an den plattenunterseitigen Meßpunkten festgestellten Werte, die um 360-400°C unter denen der Plattenoberseite liegen, was auf eine sehr starke kühlende Luftkonvektion hindeutet.

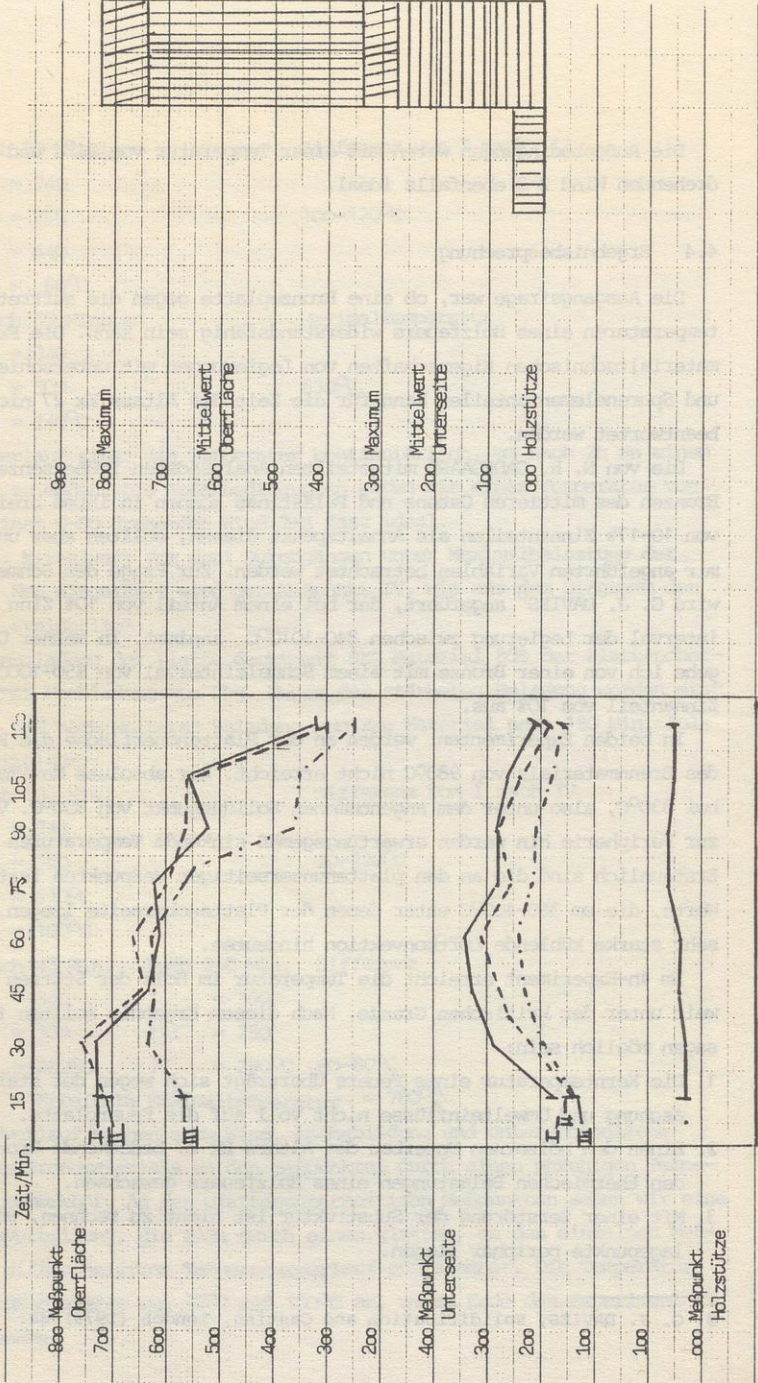
Im 4h-Experiment erreicht die Temperatur im Holz der Stützen gerade 100°C, weit unter der kritischen Grenze. Nach diesem Ergebnis sollten folgende Aussagen möglich sein:

1. Die Kerntemperatur eines Feuers überträgt sich wegen der starken Veraschung und Umwelteinflüsse nicht voll auf die Feuerplatte.
2. Einen den hölzernen Unterbau des Altars Ex 27 bedeckende Bronzeplatte ist den thermischen Belastungen eines Holzfeuers gewachsen.
3. Mit einer Zerstörung der Substruktur ist nicht zu rechnen, wenn die Auflagepunkte peripher liegen.

⁸ G. J. DAVIES, Solidification and Casting, London (1973) 85.

Mittelwert von drei Meßdurchgängen
 Außentemperatur: 21-22 °C
 V = Experiment I

Wind: 2-3 0-50 drehend-
 Flächenbelastung mit kg: 3-4 zu 45-50%
 Brennmaterial: Degussa Holzkohlenklassen, Kerntemperatur: 950 °C



Durchgang unter Maximalbelastung der Platte

Außentemperatur: 26°C

Wind: 2-3, W-SW, leicht drehend

Flächenbelastung mit kg: 9 zu 80%. Brennmaterial: Degussa Holzkohlenkissen, Kerntemperatur 950°C

V Experiment II

