

1 EINLEITUNG

1.1 Überblick zur Architekturgeschichte der Villa im Veneto

Die Architektur des Venetos¹ ist eine kulturhistorische Erscheinung, die sich in ihrer Form, Funktion und Typologie als eine von anderen zeitgenössischen Bauformen stark abgesetzte Gesamtheit präsentiert. Dies gilt insbesondere für die Villa, die wegen dieser besonderen Stellung des Venetos einerseits und der geschichtlich bedingten Gegebenheiten andererseits eine zentrale Rolle im Verständnis des Begriffes „Villa“, seines Begriffsinhaltes und des architektonischen Ausdruckes dieses Begriffsinhaltes einnimmt. Die Vielzahl der heute noch erhaltenen Bauten² bietet die Möglichkeit, ausführliche Forschungen dieses Phänomens der italienischen Architektur- und Sozialgeschichte³ durchzuführen.

In ihrem historischen Kontext, der vielleicht den zentralen nichtkunsthistorischen Parameter darstellt, kann die Entwicklung der drei oben genannten Bezugspunkte der „Villa“ im Veneto mit der politischen Situation auf dem venezianischen Festland – der sogenannten *Terraferma* – in eine Parallelität, nicht aber in eine Identität gesetzt werden.⁴

Vor der Übernahme der *Terraferma* durch die venezianische Republik – die sogenannte *Serenissima* – war das Gebiet in unterschiedliche Stadtstaaten gegliedert mit sich ständig verschiebenden Grenzen und, dadurch bedingt, mit mehr oder weniger konstanter politischer Stabilität. Im wesentlichen handelte es sich um Oligarchien ohne jeglichen Anspruch auf eine demokratische Regierungsform. Die große Ausnahme bildete Vicenza⁵, das zwar einer ständig wechselnden politischen Zugehörigkeit unterworfen war, dessen eigene Oberschicht aber nicht aus einer Familie bestand, sondern aus den Adelsfamilien des Gebietes zusammengesetzt war; in gewissem Sinne eine Analogie zu Venedig, wo die Regierungsschicht aus den Patrizierfamilien kam. Ein wesentlicher Unterschied zu Venedig war allerdings, daß es sich bei den Vicentiner um tatsächlich von einem Kaiserhaus ausgesprochene Adelspatente handelte, wohingegen die Venezianer im historischen Verständnis Patrizierfamilien waren, die durch die Serrata von 1297 zu einer geschlossenen Oberschicht wurden und sich selbst *nobil uomini* nannten, ohne echte Adelspatente zu besitzen.

Für diese frühe Zeit der Veneto-Landarchitektur, der Zeit der Stadtstaaten also, ist die Typologie und vor allem die detaillierte Ausprägung dieser Landarchitektur nur sehr schwer nachvollziehbar, hauptsächlich deshalb, weil nur sehr wenig von ihr erhalten und dieses Wenige so gut wie nicht datiert ist. Weite Flächen der Poebene waren versumpft⁶ (Abb. 1), so daß auch Probleme der Urbarmachung und dadurch bedingt die wirtschaftlich sinnvolle Landnutzung und die mit ihr im Zusammenhang stehende Landarchitektur in den Vordergrund traten. Reste dieser erhalten gebliebenen Landarchitektur sind Burgen, die in strategisch wichtigen Stellungen auf den Ausläufern der Voralpen und an den vulkanischen Hügelketten der nördlichen Poebene – den *Colli Euganei* und den *Monti Berici* – stehen. Ebenfalls erhalten geblieben sind viele der aus Ziegeln gebauten Wehrtürme – die *Torri* –, die in späteren Jahrhunderten, dank ihrer Stellung im Flachland, in vielen Fällen als Kern von Villenkomplexen dienen sollten⁷ und später infolge venezianischer Gesetzgebung⁸ in unterschiedlicher Form abgewandelt wurden und gerade dadurch einen starken formalen Einfluß auf die Villentradition des Venetos haben sollten. Die Ursprünge dieser Wehrtürme dürfen nicht mit denjenigen der Familientürme der Toskana⁹ verglichen werden, da letztere aus einer völlig anderen Tradition heraus erwachsen sind. Wenn überhaupt, dann sind die Türme auf der *Terraferma* in ihrer Entstehung und in ihrem Charakter innerhalb der Landarchitektur mit den wesentlich früheren *Domuscultae*¹⁰ Latiums und Kampagniens vergleichbar. Wie die Architektur der eigentlichen Landbevölkerung des Venetos aussah, ist kaum nachvollziehbar und kann nur durch Hypothesen vermutet werden. Wahrscheinlich gruppierten sich um diese Wehrtürme einzelne aus Holz gebaute Hütten – sogenannte *Casoni*¹¹ –, die allen Anforderungen des Lebens und Arbeitens der Landbevölkerung dienen und genügen mußten. Obwohl nicht aus dieser Zeit stammend, sind solche in dieser Tradition gebauten *Casoni* vorwiegend im Einzugsbereich der venezianischen Lagune¹² noch erhalten. Ikonografisch sind sie ausführlich festgehalten: So stellt zum Beispiel Girolamo dai Libris Gemälde *Il Presepio dei Conigli*¹³ solche Hütten dar. Ferner gibt das unpublizierte sechste Buch von Sebastiano SERLIO in den Projekten A 1, B 2 und C¹⁴ über die theoretische Bedeutung und, obwohl die drei Darstellungen im Traktat sicherlich stark formalisiert sind, auch über das

Aussehen und den Charakter dieses Bautyps Auskunft. Auch DONIS Traktat¹⁵ gibt in der hierarchischen Definition der Villentypologie die einfache Hütte aus Holz als primitivste, von allen anderen Typen umfaßte Form der Villa an. Bei DONI sind allerdings keine Darstellungen vorhanden, die eine Rekonstruktion dieses Bautyps erlauben würden.

Mit dem Ende des 14. Jahrhunderts zeigte Venedig großes Interesse, sein sehr beschränktes Gebiet auf der *Terraferma*¹⁶ zu vergrößern. Es dürften wirtschaftliche Überlegungen gewesen sein, die hinter einer Ausdehnungspolitik standen.¹⁷ Jedoch hat spätestens der sogenannte Chioggia-Krieg (1377 bis 1381), bei dem die Flotte Genuas in die Lagune eindringen konnte¹⁸ und Venedig völlig abschnitt, auch die strategische Notwendigkeit einer Pufferzone auf dem Festland aufgezeigt. Die sich hier vereinigenden wirtschaftlichen und strategischen Überlegungen dürften eine Expansion nach Westen in den Mittelpunkt venezianischer Machtpolitik gerückt haben. Durch geschickte Diplomatie und Intrigen konnte Venedig in den Jahren 1404–1405 das Gebiet, das ungefähr das heutige Veneto ausmacht (Abb. 2), für sich gewinnen.¹⁹ Dadurch trat eine gewisse, wenn auch sehr umstrittene Beruhigung der politischen Verhältnisse und eine vordergründige Stabilität auf der *Terraferma* ein. Die Umstände schlugen sich auch auf die Villenarchitektur nieder, die um diese Zeit in der historischen Retrospektive erstmals als typologischer Begriff faßbar wird.²⁰ Die zu dieser Zeit entstehende Form der Villa, zu verstehen als *autosuffiziente, extraurbane* Einheit, also als Gebäudekomplex, der mehr durch funktionsökonomische als durch formal-ästhetische Gesichtspunkte geprägt war, beeinflusste für fast zwei Jahrhunderte die ländliche Architektur. Gleichzeitig muß eine Wandlung in der Materialwahl und der Konstruktionsweise dieser unbefestigten Villenkomplexe vorstatten gegangen sein. Wurden bislang nur Gebäude in der Stadt und befestigte Bauten auf dem Land in Stein und/oder Ziegel gebaut, so wurden nun auch ganze Villenkomplexe in diesen Materialien erstellt. Die ältesten, heute noch stehenden und eindeutig datierten Villen stammen aus dieser Zeit.²¹ Die nun oftmals in diese Gebäude mit einbezogenen Verteidigungselemente dienten dabei weniger dem Schutz vor offenen Kriegshandlungen als vielmehr dem vor Landstreichern. Die architektonische Ausprägung dieser Verteidigungsnotwendigkeit ist auch im ältesten und jahrzehnte-, wenn nicht jahrhundertlang wohl auch einflußreichsten Agrikulturtraktat festgehalten, nämlich in demjenigen von Petrus De CREZENTIIUS.²² Er beschreibt darin, wie eine *ad hoc* neu zu bauende Villeneinheit erstellt werden soll: Ein quadratischer Hof wird mit Mauern umgeben und mit vier Ecktürmen versehen; die Eingänge zum Komplex befinden sich in der Mitte der vier Seiten, und das Wohnhaus soll in der hinteren Hälfte des Hofes freistehend und zentral gebaut werden. Die Beschreibung trifft auf die wenigsten Villen zu, da so gut wie keine vollkommen neu erstellt wurde²³ oder nicht in der von CREZENTIIUS erläuterten Größe. Zudem war das Ausmaß der Verteidigungsbereitschaft aus oben angeführten Gründen nicht erforderlich. Der Turm, meist noch aus älterer Zeit stammend, wurde aber nach wie vor als letzter Zufluchtsort benutzt. Die Öffnung des Komplexes nach außen, also zu den Feldern und zu den Transportwegen, und die allmähliche Vergrößerung der Villenanlagen folgten immer streng funktionellen Gesichtspunkten²⁴, so daß in ein und demselben Komplex nebeneinander zu verschiedenen Zeiten unterschiedliche Bauten entstanden, die nicht nur den jeweils momentan notwendigen Anforderungen in funktioneller Hinsicht entsprachen, sondern sich auch formal und stilistisch dem jeweiligen Usus anpaßten.

Venedigs ständige Ausdehnung auf dem Festland – bereits Mitte des 15. Jahrhunderts reichten seine Grenzen bis ungefähr 60 Kilometer vor Mailand – führte am Anfang des 16. Jahrhunderts zu einer Reaktion anderer Europäischer Staaten. So schlossen sich Frankreich, Mailand, der Kirchenstaat und die Habsburger zur *Liga von Cambrai* zusammen, um Venedigs Vordringen Einhalt zu gebieten. Die daraus entstandenen Kriege – die Kriege um die *Liga von Cambrai* – dauerten von 1509–1517. Die Vicentiner Adligen schlugen sich auf die Seite der Liga, und es war ein Vicentiner Adliger, ein gewisser Leonardo Trissino, der am 5. Juni 1509 als Kommandant einer kleinen Einheit von Liga-Truppen Vicenza auf Einladung seiner Landsleute vom venezianischen Joch befreite, und ebenso war es ein anderer Vicentiner Adliger, Luigi Da Porto, der diese Ereignisse und die Einstellung der Vicentiner für die Nachwelt festhielt.²⁵ Die Sonderstellung, die Vicenza in diesen Kriegen hatte, ist nur dadurch zu erklären, daß es Venedig im Falle von Vicenza bereits ein Jahrhundert früher nicht gelungen war, die regierende Schicht zu beseitigen, was ihr in anderen Fällen durch verschiedene Taktiken gelungen war, da Vicenza eben eine breit angelegte Oberschicht hatte und sich dadurch den venezianischen Intrigen

leichter entziehen konnte. Noch in der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts sind diese Probleme in der Polarisierung der Machtansprüche in der Architektur, d. h. im Bauablauf von öffentlichen Gebäuden in Vicenza nachvollziehbar.²⁶ Der Ausgang der Kriege, in deren Verlauf fast die ganze *Terraferma* zeitweilig in der Hand der Liga war, hat trotzdem eine Festigung der Macht Venedigs auf der *Terraferma* mit sich gebracht, weil es Venedig verstand, seine territorialen Ansprüche durch Diplomatie und Abkommen *international* anerkennen zu lassen.²⁷ Die Kriege um die *Liga von Cambray* verursachten eine weitgehende Verwüstung der ländlichen Architektur.²⁸ Venedig versuchte nun, das Veneto besser in seine Gewalt zu bekommen, nicht zuletzt zur Sicherung seiner Nahrungsversorgung durch die landwirtschaftlichen Erzeugnisse dieser Region. Dies wurde hauptsächlich auf zwei Ebenen erreicht: erstens durch eine allmähliche Infiltration des Landbesitzes durch das venezianische Patriziat, dem vorher Landbesitz auf der *Terraferma* verboten war, und zweitens durch gesetzliche Maßnahmen.²⁹ Dies hatte aber noch nicht die funktionelle Veränderung des Begriffes, des Begriffsinhaltes und der architektonischen Ausprägung der Villa zur Folge. Sie blieb noch lange Zeit eine *autosuffiziente, extraurbane* Einheit, deren individuelle Entwicklung sich eben auf funktions-ökonomische Gesichtspunkte stützte.

Diejenige gesetzliche Maßnahme, die sich auf die Villenarchitektur wohl am meisten auswirkte, wurde am 30. Juni 1520 vom venezianischen Senat erlassen.³⁰ Es handelte sich um die Enteignung von allen Befestigungsanlagen und Türmen auf der *Terraferma*. Mit diesem Gesetz erreichten die Venezianer zweierlei: Zum einen wurden dadurch mögliche zukünftige Widerstandskeime auf dem Festland einer wirksamen Verteidigung beraubt, zum anderen fielen durch die Enteignung große Landstriche in die Hand des zuständigen venezianischen Magistrats – der *Rason Vecchie* –, das diese dann zu günstigen Bedingungen an venezianische Patrizier verkaufen konnte. Die indirekte Auswirkung dieses Gesetzes und vor allem seine Bedeutung für die Architektur ist anderer Art: Es wurde durch die funktionelle Änderung ehemaliger Wehrtürme allem Anschein nach sehr effektiv umgangen. Durch das Zumauern der Zinnen und den Aufbau eines Zeldaches wurde der Wehrcharakter beseitigt, und durch die Haltung von Tauben im nun neugewonnenen Dachgeschoß wurde auch die Funktion dieser Türme geändert.³¹ Einen ihrer formalen Höhepunkte erreichte diese architektonische Entwicklung in der Villenarchitektur Andrea Palladios, der diese nun in die Bautradition eingegangene Nutzung der Türme als Taubenschläge auch in seine Villen inkorporierte, so zum Beispiel bei der Villa Emo in Fanzolo und bei der Villa Barbaro in Maser.

Die bereits in der Mitte des 16. Jahrhunderts einsetzende zentral gesteuerte Wasserpolitik der Venezianer auf der *Terraferma*, verwaltet durch den Magistrat der *Beni Inculti*³², führte auf dem Festland zu einem weit verbreiteten Wasserstraßennetz und gleichzeitig, wirtschaftlich genauso wesentlich wie der Transport von Gütern und Menschen, zur Urbarmachung von Sümpfen und kontrollierten Bewässerung von Feldern. Wiederum war es die zentralisierte Regierung, die eine solche Gesetzgebung ermöglichte. Sie wurde durchführbar, indem alles Wasser zum Staatseigentum deklariert wurde. Die wichtigste der nun entstandenen Wasserstraßen wurde die Brenta, die als Hauptverkehrsverbindung zwischen Venedig und Padua diente.

So konnten in diesem zweiten Jahrhundert der venezianischen Herrschaft auf der *Terraferma* venezianische Patrizier allmählich den lokalen Adel ersetzen, so konnte mit Hilfe gesetzlich ergriffener Baumaßnahmen die Form der *Torre* in die dem Veneto spezifische Form der *Torre-Colombara* umgewandelt werden, und so konnten durch Macht und Geld des venezianischen Patriziats (und zum Teil des lokalen Adels) Wohnhäuser von Architekten wie PALLADIO³³, SANMICHELI³⁴, SANSOVINO³⁵, und FALCONETTO³⁶ in den Villenkomplexen entstehen, die aber eben nicht die sofortige Änderung der wirtschaftlichen Einheit und der funktionellen Geschlossenheit der Villen herbeigeführt haben.

Diese Veränderung tritt erst in den beiden letzten Jahrhunderten venezianischer Herrschaft auf der *Terraferma* ein. Sie wird vorbereitet auf sozioökonomischer Ebene durch wirtschaftliche und politische Macht der Landbesitzerschicht und ihrem Wunsch nach der *Villegiatura*, – dem Sommer auf dem Lande –, der sowohl der Repräsentation und Erholung als auch der sichtbaren Vertretung ihrer Besitzinteressen diente. Obwohl die erste *Villegiatura* bereits für 1317³⁷ nachweisbar ist, war es erst der alljährliche sommerliche Exodus des venezianischen Patriziats, zunächst zu den Villen an den Ufern der Brenta³⁸, die als Verlängerung des *Canale Grande* mit all seinen Palästen betrachtet wurde, und später ins

ganze Veneto, der auf dieser Ebene zur allmählichen Veränderung des Begriffsinhaltes der Villa und dadurch auch ihrer architektonischen Manifestation führte.

Auf architekturtheoretischer Ebene wurde diese Veränderung durch PALLADIOS Traktat, den *Quattro Libri dell'Architettura*, vorbereitet.³⁹ PALLADIO legte zwar in den *Quattro Libri* die bedeutendste theoretische und didaktische Grundlage der formalen Ausprägung des Villengedankens auf dieser Ebene dar; in der Praxis⁴⁰ aber konnte er sie, eben wegen der noch herrschenden, in der lokalen Tradition verwurzelten, funktionsökonomisch orientierten Gesinnung der Landbesitzer, nur in den seltensten Fällen umsetzen. Oft wurden Villen zwar von PALLADIO gebaut, aber erst in späteren Jahrhunderten gemäß den Plänen in seinem theoretischen Werk umgebaut,⁴¹ als sich nämlich die Einstellung zur Villa allmählich und teilweise gewandelt hatte, was zu einer Verschleierung des heutigen Verständnisses des damaligen Begriffsinhaltes führen mußte. Noch zu PALLADIOS Lebzeiten (1508 bis 1580) gehörte zum Begriffsinhalt der Villa im Veneto die Integration und die funktionelle Einheit von Landwirtschaft und Repräsentation, die sich nicht durch dialektische und monokausale Argumentation voneinander trennen läßt. So war es zum Beispiel üblich, denselben Villenhof sowohl für die Landwirtschaft als auch für gesellschaftliche Anlässe zu verwenden.⁴² Erst mit den oben beschriebenen Wandlungen konnten Villen entstehen, die den landwirtschaftlichen Faktor unterordneten oder gar völlig ausschlossen.

Die architekturhistorischen Einflüsse, die hier faßbar werden, sind nun nicht mehr alleine auf Entwicklungen zurückzuführen, die für die Chronologie und die Tradition des Veneto spezifisch wären. Der Einfluß des europäischen Freimaureertums auf den Architekten Ottavio BERTOTTO-SCAMOZZI⁴³ macht sich ebenso bemerkbar wie derjenige des französischen Absolutismus auf den Dogen Pisani beim Bau seiner Villa in Stra.⁴⁴ Auch der oben erwähnte Einfluß PALLADIOS kann nicht mehr als etwas dem Veneto Spezifisches angesehen werden, denn die Bauherren im Veneto folgten seinem Beispiel nicht anders als ihresgleichen in anderen Länder.⁴⁵

Zerstört wurde diese Villentradition, durch die venezianische Macht auf der *Terraferma* entstanden, tradiert und gewandelt, erst durch den Untergang der *Serenissima* im Jahre 1798. Vereinzelt haben aber auch noch nach diesem Zeitpunkt einige Villen der großen Repräsentation gedient, so etwa die Villa Manin in Passariano,⁴⁶ die Villa des letzten Dogen, von der Napoleon gesagt haben soll, sie sei viel zu vornehm für einen einfachen Dogen, oder etwa die Villa Pisani in Stra, die venezianische Imitation von Versailles. Was nach dieser politischen Wende bestehen blieb, war einerseits die Landwirtschaft, die sich immer wieder aus funktioneller Notwendigkeit heraus alter Baustrukturen bediente, und andererseits ein dichtes Netz von Villenkomplexen und Villenteilen, die ein architektonisches Zeugnis der skizzierten Entwicklung abgeben.

Eine solche Skizzierung übergeht, selbstredend, die Überschneidung der erwähnten Epochen, ebenso wie sie nicht die Erfassung typologischer Feinheiten einer solchen Kultur erlaubt. Es ist aber wichtig festzuhalten, daß eine feinere typologische Gliederung auch nur schwer möglich wäre, denn die historischen, funktionellen, formalen, wirtschaftlichen und sozialen Gegebenheiten haben nicht die Bildung eines oder mehrerer klar faßbarer Villentypen hervorgebracht, sondern eine Vielzahl von individuell ausgeprägten Villenkomplexen gefördert. Diese Entwicklung ist nur verständlich im Phänomen des homogenen Wachstums jedes einzelnen Gebäudekomplexes, das in dieser kulturellen Tradition seine Wurzeln hat.

1.2 Bisherige Entwicklung der Thermolumineszenz-Methode

Das Phänomen der Thermolumineszenz (TL) ist in der Physik seit langem bekannt und bis heute Gegenstand eingehender Untersuchungen geblieben. Die weiteste Verbreitung fand es wohl in seiner Anwendung im Rahmen der Medizin und dort vor allem des Strahlenschutzes.

Die allererste Erwähnung dieser Erscheinung erfolgte bereits durch Sir Robert BOYLE im Jahre 1664: "Experiments and Observations upon Colours - with Observations on a Diamond that shines in the dark." Er schreibt dort: "I also brought it (the Diamond) to some kind of glimmering light, by taking it into bed with me, and holding it a good while upon a warm part of my naked body."⁴⁷

Die ersten Untersuchungen in neuerer Zeit erfolgten im Zusammenhang mit geologischen Fragestellungen, so z. B. bei der Identifizierung von Mineralien und beim Aufspüren von Druck- und Schallwellen. Aber auch die Möglichkeit der Anwendung dieses Konzepts als Datierungsmethode, aufgrund der Proportionalität zwischen der Menge des emittierten Lichts und der Zeit seit dem letzten Erwärmen, erfolgte zunächst in geologischem Kontext, z. B. auf Kalksedimente, Felsen und Meteorite. Die grundlegenden Arbeiten auf diesem Gebiet legten im Jahre 1953 DANIELS⁴⁸ und 1957 HOUTERMANS.⁴⁹ Letzterer untersuchte die thermische und Strahlengeschichte natürlicher Kristalle und machte TL-Messungen an Meteoriten, um die Zeit ihres Aufenthaltes im Weltraum aufgrund ihrer kosmischen Strahlenexposition abzuleiten. Aber er arbeitete auch schon mit Keramik.

Für die Archäologen war u. a. auch von Interesse, daß die TL gegenüber der nur auf organisches Material anwendbaren C-14-Datierung den Vorteil besaß, in der Regel über viel mehr Probenmaterial zu verfügen, aber doch weit weniger benötigte als die Datierung mit Hilfe des Archäomagnetismus, der darüber hinaus wegen der Orientierungsprobleme stets In-situ-Funde erforderte. Und gebrannter Ton – ihr Hauptanwendungsmaterial – ist zumindest in Form von Scherben, praktisch in allen Siedlungsschichten zu finden. Denn der Mensch hatte frühzeitig gelernt, aus diesem dauerhaften, leicht zu verarbeitenden und praktisch überall zu findenden Material seine täglichen Gebrauchs- und Kultgegenstände herzustellen. (Näheres zum Vergleich der einzelnen Methoden untereinander siehe weiter unten in Kapitel 3.4.)

In dieses Blickfeld wurde die TL 1960 gerückt, und zwar durch zwei Arbeitsgruppen in Bern⁵⁰ (wiederum Houtermans et al.) und Los Angeles.⁵¹ Letztere wandte die Methode mit bereits erstaunlicher Genauigkeit auf 18 datierte Scherben griechischer Keramik aus der Zeit von 1000 v. Chr. bis 400 n. Chr. an und bestätigte das Alter aller Proben mit einer Fehlerbreite von 400 Jahren, davon jeweils 11 und 7 mit einem Fehler von 200 bzw. 100 Jahren. Das entspricht Genauigkeiten von 17,4 % bzw. 8,7 % bzw. 4,3 %.

In den darauf folgenden Jahren hat sich besonders die Gruppe um AITKEN in Oxford um die Weiterentwicklung dieses Verfahrens verdient gemacht, und zwar zunächst im Jahre 1962 durch TITE und WAIN⁵² sowie ein Jahr später durch AITKEN, TITE and REID⁵³, wobei die Keramikscherben hier noch lediglich zu einer Korngröße von < 130 µm zerkleinert wurden.

Ein wesentlicher Fortschritt ist dann dadurch erzielt worden, daß man dazu überging, nur zwei bestimmte Kornfraktionen zu benutzen und damit zwei Routineverfahren erarbeitete, die heute noch am häufigsten Anwendung finden. Das ist einmal der Bereich zwischen 1 bis 8 µm, eingeführt 1967 durch D. W. ZIMMERMAN⁵⁴ und die Fraktion um 100 µm, eingeführt durch S. FLEMING.⁵⁵

Während diese sogen. konventionellen und einige andere (des experimentellen Aufwandes und der Materialabhängigkeit wegen) weniger verbreiteten Spezialverfahren den Zeitraum von ca. 400 bis über 10 000 Jahre vor der Gegenwart zu erfassen erlauben, konnte 1973 mit der Einführung der Pre-dose-Technik durch FLEMING⁵⁶ der Anschluß bis fast an die Gegenwart hergestellt werden, vorausgesetzt, daß das jeweilige Material die Anwendung der betreffenden Methode erlaubt.

Eines der bedeutendsten TL-Labors, die Gruppe um MEJDAHL in Risø begann als erstes 1978 damit, das Meßverfahren zu automatisieren. Dabei können die Proben im Rahmen der Grobkorntechnik auf einem Karussell auf der einen Seite bestrahlt und auf der anderen ausgeglüht und vermessen werden.⁵⁷

Zur schnelleren rechnerischen Auswertung von Glühkurven sind inzwischen zeitsparende Computerprogramme für Tischrechner entwickelt worden, die man käuflich erwerben kann. Einige Labors, so auch das Rathgen-Forschungslabor, haben wegen ihrer jeweils anders gelagerten Auswertemethode und/oder Fehlerrechnung eigene Programme entwickelt.

Inzwischen sind anlässlich einer Zählung durch „Ancient-TL“⁵⁸ 63 TL-Laboratorien in aller Welt adressenmäßig erfaßt worden, von denen wohl ca. 20 sich intensiver mit dieser Materie befassen dürften. Darunter sind auch einige wenige, die sich völlig auf den Einsatz in der Praxis, d. h. in der Geologie oder Archäometrie etc., spezialisiert haben, während andere an der Weiterentwicklung der Methode arbeiten.

Soweit die bisherigen Anwendungen sich auf gebrannten Ton bezogen, standen Scherben von Vasen und anderen Keramikgegenständen bei weitem im Vordergrund. Datierungen von größeren Objekten wie Ofenruinen oder Mauerreste finden sich in der Literatur schon viel seltener. Dagegen sind TL-Untersuchungen von kompletten, heute noch stehenden Gebäuden, von einigen Gelegenheitsdatierungen abgesehen⁵⁹, nie systematisch durchgeführt worden. Der Grund dazu ist wohl in der zu großen Fehlerbreite zu suchen, die entsteht, wenn die Methode ungenügend an die besonderen Gegebenheiten der Gebäudedatierung adaptiert wird.

1.3 Naturwissenschaftliche Grundlagen der Thermolumineszenz

Unter Lumineszenz versteht man die Absorption von Energie in Materie und ihre Wiederaussendung in Form von elektromagnetischer Strahlung des sichtbaren Spektralbereichs oder in dessen Nähe. Wird diese durch Wärmezufuhr ausgelöst, so spricht man von Thermolumineszenz (TL). Dabei kann die anfängliche Anregung auf verschiedenem Wege erfolgen, etwa durch Licht, Wärme, mechanische Beanspruchung, chemische Reaktion oder Teilchenbeschuß. Nur die letztgenannte Möglichkeit ist in diesem Zusammenhang von Interesse: die sogen. strahleninduzierte TL.

Es mag nützlich sein, sich das Tonmaterial, aus dem die Ziegel bestehen, der Einfachheit halber aus zwei Komponenten bestehend vorzustellen, und zwar aus

1. einem bestimmten Anteil TL-fähiger Mineralien, allen voran der Quarz, aber auch Feldspat und einige andere mehr, sowie
2. der sie umgebenden Tonmatrix, worunter der ganze Rest verstanden werden soll.

Während nun die Matrix durch ihren Gehalt an Radioisotopen Sitz der auch sonst überall in der Erdkruste in verschiedener Stärke auftretenden natürlichen Radioaktivität ist, sind die genannten Mineralien so gut wie strahlungsfrei, dafür aber in der Lage, einen bestimmten Teil der sie treffenden Strahlung zu speichern. Der kernphysikalische Mechanismus der Strahlenspeicherung und -abgabe kann schematisch anhand des Energiebändermodells dargestellt werden. (Abb. 3): Trifft radioaktive Strahlung ausreichender Energie auf eine Quarzgitterstruktur, so werden darin eine Reihe von Elektronen [●] von ihren Mutteratomen getrennt, d. h. sie werden ionisiert. Von ihrer ursprünglichen Bindung gelöst, können sie nun frei durch das Kristallgitter diffundieren. Im Bild des Bändermodells bedeutet dies, sie werden unter dem Einfluß der Ionisationsstrahlung vom Valenzband [VB] in das energetisch höhere und durch eine Energielücke davon getrennte Leitungsband [LB] angehoben. Die meisten Elektronen fallen nach kurzer Zeit wieder in das Valenzband zurück, d. h. sie rekombinieren mit den Mutteratomen und interessieren daher in diesem Zusammenhang überhaupt nicht.

Das eine oder andere fällt jedoch nicht zurück: Auf seinem Diffusionsweg durch das Kristallgitter gelangt es irgendwann in die Nähe einer Elektronenfalle, „trap“ genannt, und wird von ihr eingefangen. Dabei handelt es sich um Gitterdefekte, deren einfachster Typ die negative Ionenfelle ist. Ebenso häufig treten aber Zwischengitterplätze und Verunreinigungsatome auf. (Abb. 4)

Ein Elektron in einem trap befindet sich in einem energetisch höheren Zustand als an das Mutteratom gebunden (aber dennoch tiefer als das Leitungsband). Darum haben wir es hier mit einer Form der Energiespeicherung zu tun. Nun gibt es aber nicht nur eine Sorte von traps, sondern sehr viele, nämlich genau soviel, wie Defektypen vorhanden sind. Und jede Sorte entspricht dabei einem der verschiedenen Energiezustände $T_1, T_2, T_3, \dots, T_N$. Man spricht auch von Energieniveaux. Die Aufenthaltsdauer eines Elektrons in einem der T_i hängt – von der Umgebungstemperatur abgesehen – ganz entscheidend vom energetischen Abstand E_i zwischen T_i und dem Leitungsband ab.⁶¹ Je kleiner E_i ist, je näher also T_i am Leitungsband liegt, desto weniger fest ist das Elektron in dieser Falle gebunden, d. h. desto weniger Energie muß aufgewendet werden, um es daraus zu befreien – und umgekehrt. Von den vielen möglichen T_i interessieren im Rahmen der Datierung nur diejenigen, deren Energiespeicherung über Zeiträume, die datiert werden sollen, stabil bleibt: Im Falle antiker Scherben sind dies einige Hunderttausend bis Millionen Jahre, im Falle von Renaissance-Villen genügen rund tausend Jahre.⁶²

Im Zusammenhang mit der Ionisation eines Elektrons entsteht aber jedesmal ein Loch [o] im Valenz-

band, das auf seine Art frei durch das Gitter diffundieren kann, bis es von einem Lumineszenzzentrum L (s. Abb. 3) eingefangen wird. Diese sind auf Verunreinigungen wie Silber- und Manganionen zurückzuführen.

Führt man dem Kristallgitter Energie zu, z. B. dadurch, daß man die ganze Probe erwärmt, so nehmen die Gitterschwingungen ebenfalls zu. Sie werden schließlich so stark, daß die Elektronen aus ihren Bindungen gelöst werden, und zwar bei niedrigen Temperaturen zunächst aus den schwachen, bei höheren Temperaturen auch aus den festeren Bindungen. Die Elektronen diffundieren danach frei durch das Gitter. Im Bändermodell heißt dies, die Elektronen werden aus ihren traps befreit und gelangen wieder zurück in das Leitungsband. Bei tiefen Temperaturen zunächst aus den energetisch niedrigeren (E_i ist klein), bei höheren Temperaturen auch aus den energetisch höherer Niveaux (E_i ist groß). Nach einiger Zeit werden sie von einem Lumineszenzzentrum L angezogen und vereinigen sich dort je mit einem vorher dorthin gelangten Loch. Dieser Vorgang gibt Anlaß zur Aussendung von sichtbarem Licht (Photonen) bestimmter Wellenlängen.⁶³

Je intensiver nun die ionisierende Strahlung ist, die auf eine Anzahl von Quarzkristallen (z. B. eingebettet in einen im Erdreich lagernden Scherben oder in einem noch in seinem Mauerverband sich befindenden Ziegel) trifft, und je länger sie ihr ausgesetzt sind, desto mehr Elektronen werden sich in den T-Niveaux ansammeln. Desto größer aber wird auch die Lichtausbeute nach dem Erwärmen sein.

Die erste Erwärmung erfolgt in der Regel durch den Brand des Ziegels oder Tontopfes oder wie auch immer der Ton geformt sein mag: Alle T_i -Niveaux werden entleert, vorausgesetzt, daß die Brenntemperatur hoch genug war. D. h. der antike Keramiker oder Ziegelhersteller stellt die radioaktive Uhr für uns unbewußt auf Null.⁶⁴ Nach dem Abkühlen beginnt der Vorgang der Ionisation, Diffusion und des Einfangs in den T_i von neuem.

Das nächste Erwärmen erfolgt in der Regel im TL-Labor.⁶⁵ Dieses Mal wird eine kleine Probe des Materials gezielt erwärmt und die Lichtausbeute elektronisch gemessen, verstärkt und registriert: entweder von einem Schreiber als Kurve aufgezeichnet und/oder von einem Rechner gespeichert. Die Höhe dieser Kurve ist dabei ein Maß für die Lichtausbeute, die ihrerseits dem Zeitraum zwischen dem letzten Brand und dem Meßtage proportional ist.

Bestrahlt man dann dieselbe Probe mit einem kalibrierten radioaktiven β -Strahler (meist Strontium-90), d. h. verabreicht man ihr – den natürlichen Bestrahlungsvorgang in stark verkürzter Zeit simulierend – eine genau bekannte, künstliche Dosis, angegeben in rad⁶⁶, so kann man eine zweite Glühkurve erzeugen. Ist diese künstliche Dosis genauso groß, wie die natürliche es war, werden im Prinzip beide Kurven gleich hoch ausfallen, und man kann die letztere als, Archäologische Dosis Q_0 ausdrücken:

$$Q_0 = \frac{\text{Natürliche TL}}{\text{TL pro rad der künstlichen Bestrahlung}}$$

Ist darüber hinaus die pro Jahr auf die Quarzkörner auftreffende Strahlung bekannt, so läßt sich die Altersgleichung in ihrer einfachsten Form wie folgt ausdrücken:

$$\text{Alter A} = \frac{\text{Archäologische Dosis } Q_0 \text{ (in rad)}}{\text{Jahresdosis D (in rad pro Jahr)}}$$

Unter der Jahresdosis D ist die natürliche radioaktive Umgebungsstrahlung zu verstehen, der die Probe (bzw. ihr Quarzanteil) an ihrem jeweiligen historischen Fundort während eines Jahres ausgesetzt ist.

Sie besteht grundsätzlich aus drei verschiedenen Komponenten:

1. α -Strahlen: doppelt geladene Heliumkerne
2. β -Strahlen: Elektronen
3. γ -Strahlen: elektromagnetische Kernstrahlung

Die jeweilige Intensität der einzelnen Anteile ändert sich mit der chemischen Zusammensetzung der Umgebung. Darunter ist das den Ort der Probe umgebende Material zu verstehen, und zwar allseitig bis zu einer Entfernung, die der Reichweite der energiereichsten Strahlung entspricht, d. h. bis ca. 24 bis 30 cm.

Aufgrund ihrer unterschiedlichen Energien und Ionisationsdichten sind jedoch ihre Einzelreichweiten im Ton recht unterschiedlich:

- α -Strahlen: 20-25 μm
- β -Strahlen: ca. 2 mm
- γ -Strahlen: 24-30 cm

Die α -Strahlen stammen dabei zum größten Teil aus 2 radioaktiven Zerfallsreihen, und zwar derjenigen des Uranisotops U-238 und des Thoriumisotops Th-232. Ein kleiner Anteil rührt noch vom U-235 her, das aber nur zu 0,72 % im natürlichen Uran enthalten ist. Ihre Reichweite in Quarz ist aufgrund der sehr hohen Ionisationsdichte die kleinste (s. o.). Die Bestimmung der entsprechenden Jahresdosisrate erfolgt üblicherweise mit sog. α -Zählern, die die α -Strahlen der Uran- und Thoriumserie zusammen oberhalb einer elektronisch einstellbaren Schwelle zählen⁶⁷.

Der β -Anteil stammt teils ebenfalls aus den genannten Zerfallsreihen und ist aus der α -Zählrate prozentual zu berechnen, teils aus dem natürlich vorkommenden Kaliumisotop K-40, das sich beim Zerfall zu 89 %⁶⁸ über β -Strahlung umwandelt. Dieser 2. Anteil ist aus dem K₂O-Gehalt der Probe oder durch β -Dosimetrie zu gewinnen.⁶⁹

Die γ -Jahresdosis hat 3 Ursprünge:

Ein Teil stammt wiederum aus den Zerfallsreihen, ein anderer aus dem K-40. Beide Teiljahresdosisraten können rechnerisch ermittelt werden. Eine dritte ist auf den Einfluß der kosmischen Strahlung zurückzuführen und wird üblicherweise auf 30-40 mrad/a geschätzt. Eleganter und korrekter ist die auch hier verwendete γ -TL-Dosimetrie, die alle drei γ -Anteile zusammen am Ort der Probe mißt (s. Kap. 2.2). Im Falle homogener Ziegelwände besteht zudem die Möglichkeit, den γ -Anteil über eine mathematische Modellrechnung zu bestimmen (s. dazu Kap. 2.3). Die Reichweite der γ -Strahlung ist die größte und beträgt im Erdreich im Mittel 30 cm, im Ziegelmaterial 24 cm.

Der Nenner hat dadurch die folgende Form:

$$D = 1,78 \cdot a \cdot a + D_\beta + D_\gamma + D_c$$

Dabei haben die Größen folgende Bedeutung:

- 1,78 : Umrechnungsfaktor
- a : Alpha-Zählrate pro cm^2 und pro ksec.
- a : sogen. a -Wert, der den unterschiedlichen TL-Empfindlichkeiten von α - und β -Strahlung Rechnung trägt (70)
- D_β : β -Jahresdosis
- D_γ : γ -Jahresdosis
- D_c : kosmischer Anteil

Damit lautet die Altersgleichung

$$\text{Alter } A = \frac{Q_0}{1,78 \cdot a \cdot a + D_\beta + D_\gamma + D_c}$$

Im Laufe der Zeit sind verschiedene Datierungstechniken entwickelt worden, die besondere Materialgegebenheiten berücksichtigen. Die wichtigsten und am häufigsten verwendeten sind im folgenden zusammengestellt (siehe dazu auch Tab. 1):

- a) Grobkorntechnik (Quartz Inclusion Technique).⁷² Hierbei nutzt man die Tatsache aus, daß die Reichweite der α -Strahlung in Quarz nur 20-25 μm beträgt. Üblicherweise sucht man sich die Korn-

fraktion von ca. 100 μm aus, und zwar entweder einzeln unter dem Mikroskop oder mit Hilfe eines magnetischen Separators. Sodann ätzt man 25 μm rundherum mit Flußsäure ab. Dadurch ist der gesamte α -Strahleneinfluß eliminiert, und man spart sich die umständliche und zeitraubende α -Zählung. Dementsprechend vereinfacht sich auch der Nenner der Altersgleichung. Das hat allerdings zur Folge, daß dann die restlichen Dosisraten umso genauer bestimmt werden müssen (siehe jedoch dazu Kap. 2.2).

b) Subtraktionstechnik (Subtraction Dating).⁷³

Häufig tritt der Fall auf, daß eine Datierung dringend erwünscht, die betreffende Umgebungsdosis aber unbekannt ist, weil die Objekte z. B. aus einer früheren, heute nicht mehr zugänglichen Grabung stammen. In diesem Falle ist folgendes Vorgehen hilfreich: Schreibt man sich die Altersgleichung sowohl für die Grob- als auch die Feinkornmethode auf und zieht beide voneinander ab, dann resultiert

$$\text{Alter } A = \frac{Q_F - Q_G}{1.78 \cdot a \cdot \alpha + 0.05 D_\beta}$$

D. h. der Term ($D_\gamma + D_c$) ist eliminiert. F und G beziehen sich dabei auf die Fein- bzw. Grobkorntechnik. 0,05 ist der von der Grobkornmethode stammende Schwächungskoeffizient für die β -Strahlung.

Der große Nachteil dieser Technik ist der experimentelle Aufwand zweier unterschiedlicher Bestimmungen der archäologischen Dosis Q. Da das Alter darüber hinaus nur schwach von D_β abhängt, müssen die restlichen Größen Q_F , Q_G , a und α mit hoher Präzision bestimmt werden, um die Schwankung in der Altersangabe in erträglichen Grenzen zu halten.

Aus diesem Grunde wird die Subtraktionsmethode nur in Einzelfällen oder in kleinen Serien angewandt.

c) Pre-Dose-Technik (Pre-Dose-Technique).⁷⁴

Während die konventionellen Datierungsmethoden (Grob- und Feinkornverfahren) zur Bestimmung der archäologischen Dosis den 375 °C-Peak des Quarzes verwenden, der mit seiner mittleren Lebensdauer von über 10⁶ Jahren über die zu messenden historischen Zeitspannen sehr stabil ist, hat man es in der Pre-Dose-Technik mit dem 110 °C-Peak zu tun, der eine Lebensdauer von lediglich 2,5 Stunden besitzt und in den Glühkurven von antiken Proben überhaupt nicht mehr zu sehen ist. Sein Vorteil beruht auf einem ganz anderen Effekt:

Er ist hochempfindlich, und die Steigerung dieser Empfindlichkeit (gemessen durch kleine Testdosen von < 10 rad) als Folge einer Erhitzung der Probe (= Aktivierung) auf 400–500 °C ist proportional zur radioaktiven Dosis (pre-dose), die die Probe seit dem letzten Brand erhalten hat.

Aufgrund von Sättigungserscheinungen der damit zusammenhängenden traps ist man jedoch i. a. auf den Dosisbereich von wenigen rad bis zu ca. 400 rad beschränkt. Das besitzt wiederum den großen Vorteil, die Einsatzmöglichkeiten der TL auch auf wesentlich jüngere Zeiten ausdehnen zu können.

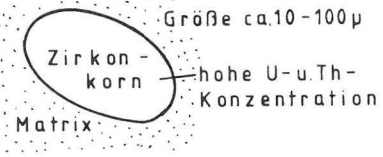
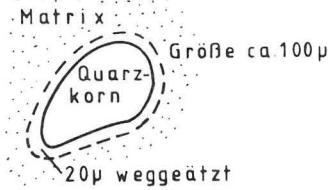
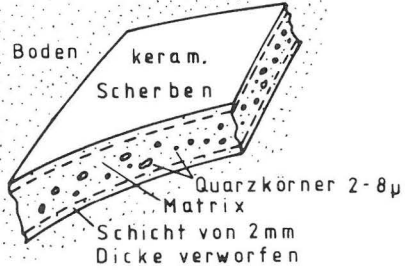
Der große Vorteil dieser Technik (etwa gegenüber der Feinkorntechnik) ist

1. die Verwendung nur einer Mineralsorte, nämlich Quarz
2. keine Störung durch spurious light
3. i. a. gute Signalhöhen.

Für den Fall der Villen im Veneto wäre sie somit theoretisch die ideale Datierungstechnik, hat sich aber in der Praxis nicht bewährt (s. dazu Kap. 2.2).

d) Daneben gibt es noch die sog. Zirkon-Technik.⁷⁵

Gewisse schwere Minerale wie Zirkon und Apatit besitzen nicht nur vernünftige TL-Eigenschaften, sondern sind darüber hinaus aufgrund ihrer Uran- und Thoriumgehalte selbst Strahler. Dabei sind



A

Teilchenart	α	β	γ
	anteilig in %		
Umgebung			20
Matrix	60	20	
Quarz			

B

Teilchenart	α	β	γ
	anteilig in %		
Umgebung			30
Matrix		70	
Quarz			

C

Teilchenart	α	β	γ
	anteilig in %		
Umgebung			
Matrix			
Zirkon	100		

Für die Architekturgeschichte optimal, da alle Voraussetzungen erfüllt

In der Architekturgeschichte bisher nicht verwendet wegen fehlender Plateaux und Restdosen nach Ätzzvorgang

In der Architekturgeschichte nicht verwendbar wegen meist fehlender Zirkonkristalle

Tabelle 1: Schematische Darstellung der für die verschiedenen Datierungstechniken verwendeten Keramikfraktionen⁷¹:

- A: Feinkorntechnik
- B: Grobkorntechnik
- C: Zirkontechnik

etwa 100 ppm in Zirkon und etwa 30 ppm in Apatit typisch. Dies bedeutet aber, daß die Strahlung, die die betreffenden Mineralkörner im Laufe der Zeit erhalten, aus ihnen selbst stammt, und sowohl die γ -Strahlung aus der Umgebung als auch die β -Strahlung aus der Tonmatrix tragen dann lediglich zum Untergrund bei. Sobald diese Selbstradioaktivität 100 ppm überschreitet, kann dieser sogar vernachlässigt werden.

e) Feinkorntechnik (Fine Grain Technique).⁷⁶

Hier werden im Gegensatz zur Grobkorntechnik gerade diejenigen Quarzkörner verwendet, die so klein sind, daß sie auf jeden Fall von der α -Strahlung völlig durchdrungen werden, üblicherweise 1–8 μm . Ihre Separation gelingt durch Vorsieben und anschließende Schwereretrennung in Aceton. (s. dazu Kap. 2.2.)

Die unter a) und e) genannten Techniken sind die am häufigsten angewandten Routineverfahren.

1.4 Einige Besonderheiten bei der Anwendung der Thermolumineszenzmethode in der Architekturgeschichte

Bei der TL-Datierung von in situ-Ziegelmauern sind im Vergleich zu archäologischen Bodenfunden, die bisher überwiegend untersucht worden sind, gewisse Unterschiede festzustellen und zu berücksichtigen.

Der Feuchtigkeitsgehalt eines Objektes kann sich zusammen mit seiner Umgebung – eventuell wiederholt und sogar drastisch – geändert haben, ohne daß wir davon Kenntnis besitzen.

Folgendes Beispiel soll dies veranschaulichen:

Im Falle eines völlig ausgetrockneten Brunnens, in der Regel eine willkommene Fundgrube für den Archäologen, weiß man sogar, daß eine Änderung eingetreten ist, aber meist nicht wann und in welchem Zeitintervall dies geschah. Darüber hinaus sind die Fundstücke nicht alle gleichzeitig hineingelangt, sondern normalerweise im Laufe von Jahrzehnten oder gar erst eines Jahrhunderts. Und die nachfolgenden Objekte und Schlammschichten werden die darunterliegenden komprimiert haben. Dies bedeutet aber: Die Umgebungsstrahlung einer Probe war in der Anfangszeit der Bodenlagerung einer zeitlichen Änderung unterworfen. Beide Faktoren, also sowohl die Änderung der Umgebungsfeuchte als auch -strahlung, können – auch jeder für sich – zu erheblichen Fehlern im Endresultat führen.

Im Falle noch stehender Gebäude können dagegen diese beiden Fehlerquellen mit entsprechender Vorsicht vermieden werden. Natürlich kann ein Gebäude umgebaut worden sein, doch das geschah durch Änderung ganzer Mauern oder zumindest Mauerteile, also Partien, die umfangreicher sind als die Größe der in der Rechnung zu berücksichtigenden Strahlungsumgebung einer Probe (Radius von ca. 30 cm). Oberhalb der aufsteigenden Feuchtigkeit ist das Außenmauerwerk außerdem nur den Witterungseinflüssen ausgesetzt und unabhängig von Wasseränderungen im Boden. Mit anderen Worten: Bei der Datierung von Ziegelmauerwerk befinden sich die Proben in einer Umgebung mit erheblich größerer Homogenität, und zwar sowohl hinsichtlich des Materials als auch der Lagerzeit.

Ein grundsätzlicher Unterschied besteht auch in der Probennahme: Im Rahmen einer archäologischen Grabung wird der Boden etwa quadratmeterweise Dezimeter um Dezimeter abgetragen. Diese Portionen werden dann visuell durchsucht und gesiebt. Stößt man dann auf ein datierungswürdiges Keramikstück, so ist zu diesem Zeitpunkt bereits die Hälfte der ursprünglichen Strahlungsumgebung verloren (nämlich der abgetragene Teil). In der Regel wird der Entschluß zur Datierung aber erst gefaßt, wenn die Grabung viel weiter fortgeschritten ist, d. h. wenn der Archäologe eine bessere Übersicht hat. Eine Mauerprobe wird dagegen mit Hilfe eines Bohrers entnommen, geeignet verpackt und ins Labor geschickt. Die Umgebung jeder einzelnen Probe bleibt aber erhalten und somit für Zusatz- und Nachuntersuchungen auch später noch erreichbar.

Diese Überlegungen haben u. a. dazu geführt, daß folgende Meß- und Berechnungsbestandteile der in der Archäologie üblichen TL-Anwendung im Labor experimentell bestimmt und dann in die architekturgeschichtsbezogene TL integriert wurden:

1. Die Frage, inwieweit die α -Zählung geeignet ist, die γ -Dosisrate zu bestimmen, konnte mit Hilfe eines Modells, bestehend aus ca. 1 m^3 aufeinandergeschichteter Ziegelsteine, geklärt werden. Dazu wurden die Ergebnisse von (in dem Ziegelstoß verteilten) TL-Dosimetern mit einer Modellrechnung verglichen, in die neben Standardziegelmaßen und Mörtelfugengröße im wesentlichen die α -Zählrate einging. (Vergl. dazu Kap. 2.2.)

2. Das wichtige Problem der Feuchtigkeitsschwankungen in der Vergangenheit, die einen erheblichen Einfluß auf den Gesamtfehler der Einzelprobe ausüben, wurde ausgehend von meteorologischen Daten durch Bewitterungsexperimente im Labor geklärt. (Siehe dazu Kap. 2.3.6.4.)