

Naturbaustoffe im Nassbereich – bauphysikalische Untersuchungen an einem marokkanischen Dampfbad aus Lehm und Tadelakt

Einleitung und Problemstellung

Will die Naturbaustoffbranche aus der Nische ihres vorrangigen Nutzens für den privaten Sektor heraus und ist der Einsatz natürlicher Baustoffe auch in öffentlichen Bauverfahren avisiert, so sind Gewährleistungssicherheiten durch Normung unabdingbar. Der Dachverband Lehm hat sich zur Aufgabe gemacht, einen entscheidenden Schritt zu mehr Rechtssicherheit in Form entsprechender Regeln wie Normen zu schaffen.¹ Zusammen mit der ARGEBAU und dem Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) wurden technische Baubestimmung für Lehmabauarbeiten erarbeitet – die Lehmabauregeln. In diesen sind Baustoffe, die vorrangig im Innenraum Anwendung finden, weniger bedacht als die, die im baukonstruktiv-statischen Bereich von Bedeutung sind. Dazu kommt noch, dass allgemein die entsprechenden Genehmigungs- und Kontrollverfahren per se auf die Anwendung der Baustoffe ausgerichtet sind und bis dato keine einheitliche Bewertung hinsichtlich ihrer Herstellung und Entsorgung/Wiederverwertung² und der die Gesellschaft und Natur belastenden Kriterien erfolgt.

Zurückkommend auf den Innenraum ist der Schwerpunkt der Untersuchungen deshalb auf ein Material gerichtet, das derzeit vorrangig in der Innenarchitektur zum Einsatz kommt und zwar in einem Bereich, welcher durchaus als Extrembereich der Nutzung von Baustoffen allgemein angesehen werden kann. Die Rede ist von Tadelakt und seinem Einsatz im Nassbereich und hier wieder schwerpunktmäßig in der Anwendung im Saunabau.³

Auch für diesen extremen Nutzungsbereich trifft zu, was eingangs erwähnt wurde: Eine Rechtssicherheit schaffende Baubestimmung für den Einsatz des Baustoffes existiert nicht, was den großflächigen Einsatz des Putzes zumindest im öffentlichen Bereich risikoreich macht. Darüber hinaus scheinen die allgemeinen Bauregeln den Einsatz im Nassbereich per se stiefmütterlich zu behandeln, denn was man bspw. unter *wasserdicht*, *-abweisend*, *-hemmend* oder *-fest* verstehen soll, scheint nicht einmal den Fachleuten zweifelsfrei.⁴ Dazu kommt noch die Unsicherheit hinsichtlich der Materialbeschaffenheit, sodass derzeit nicht eindeutig geklärt ist, was man materialanalytisch überhaupt unter der Bezeichnung *Tadelakt* verstehen kann – mit anderen Worten, welche chemische Zusammensetzung und Sieblinie unter den Begriff Tadelakt fällt. Genau hier setzt das Forschungsvorhaben an.

Neben der Materialanalytik von auf Lehm und Kalk basierenden Baustoffen, die im Nassbereich zum Einsatz kommen können, sollen auch Aspekte der Ökologie und Nachhaltigkeit, der Bewertung von Wohlbefinden und Raumwahrnehmung Eingang in die Forschung finden. Ziel ist, dazu messbare, numerisch fassbare, wissenschaftlich valide Aussagen zu treffen, die auch einer komparativen Analyse zu anderen Baustoffen standhalten.

Ergebnis soll eine begrifflich eindeutige Nomenklatur sein, die darüber hinaus klare Anwendungsszenarien für den Baustoff Tadelakt formuliert und somit Sicherheit im Einsatz garantiert.⁵

Hierbei ist auch an die zukünftige Entwicklung technologischer Abläufe gedacht, die das Verarbeitungsergebnis reproduzierbar und verifizierbar machen. Durch die bisher und ursprünglich stark individuell und manuell geprägte Verfahrensweise bei der Herstellung von Tadelakt ist dies ein besonderes Problem, das einer Klärung bedarf.

Aus dieser holistischen Bewertung heraus ist es somit nicht aussichtslos, dass der Baustoff Tadelakt im Zusammengehen mit der Entwicklung maschineller Technologien sowohl in seiner ursprünglichen, originären Beschaffenheit als auch in seiner abänderlichen europäischen Zusammensetzung seine wirtschaftliche Bedeutung für die Ausformung und den Schutz von Bauteilen im extremen Nassbereich verstärken kann.

Im Speziellen wäre hiermit auch ein Beitrag zur Untersuchung von Kalk als Zuschlag und Schutzhülle für Lehm erbracht, da gerade dem Einsatz von Lehm im Nassbereich durch seine hygroskopischen Eigenschaften klare Grenzen gesetzt sind.

Forschungsfragen

Folgenden Fragestellungen geht das Forschungsvorhaben nach:

- Was ist Tadelakt? Eine Verarbeitungstechnik oder ein Baustoff – und wie setzt er sich zusammen?
- Wie kann eine dauerhafte Verbindung in chemischer und physikalischer Hinsicht zwischen Lehm und Kalk hergestellt werden?⁶
- Welchen Einfluss hat die Technologie der Ausführung von Tadelakt-Flächen auf die Qualität des Tadelakts?
- Welche Auswirkung hat die Ausführung des Brennprozesses auf die Qualität des Kalks?⁷

* Das Forschungsprojekt wird betreut durch Prof. Dr.-Ing. Henning Bombeck, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Siedlungsgestaltung und ländliche Bauwerke, Universität Rostock, Prof. Dr.-Ing. Ulrich Diederichs, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Bereich Bauingenieurwesen & Kompetenzzentrum Bau MV, Hochschule Wismar, Prof. Dipl.-Ing. Andrea Gaube, Fakultät Gestaltung, Lehrgebiet Stadt- und Gebäudesanierung, Hochschule Wismar

Natural building materials in wet areas – building physics investigations on the Moroccan steam bath in earth and tadelakt

Introduction and problem definition

If the natural building material sector wishes to move beyond the niche of its main activities and into the private sector and if the use of natural building materials is also to be promoted in the public building sphere, then the assurance a guarantee provides by standardisation is essential. The Dachverband Lehm has taken on the task of moving towards more legal security by creating appropriate rules such as standards.¹ Together with ARGEBAU and the German Institute for Building Technology (DIBt) technical building standards for earthen building works have been prepared – the “Lehmbau Regeln”. In these the building materials that are principally destined for internal applications are considered to a lesser extent than those that are important for the structural realm of building construction. Another factor is that generally the required approval and inspection procedures are aimed per se at the use of building materials and to date there is no uniform evaluation with regard to their manufacture and disposal/reuse² as well as the criteria that put a strain on society and nature.

Returning to the subject of internal space, the emphasis of these investigations therefore concern a material that is at present principally used in interior architecture and indeed in an area that can definitely be regarded as an extreme situation for building materials in general. Referred to here is tadelakt and its use in wet areas, mainly in sauna construction.³

Even for this extreme area of application, what was mentioned above still applies: building regulations that provide legal security do not exist, making the widespread use of this plaster at least in the public domain fraught with risk. Furthermore, the general building regulations are half-hearted in their treatment of the question of their use in wet areas, because what one understands for example by *watertight*, *water repellent*, *water resistant* or *waterproof* does not seem to be absolutely clear even to the experts.⁴ Added to this is the lack of security with regard to material composition, so that in terms of material analysis it is not at present unambiguously clarified what one actually understands by the term tadelakt – in other words, what its chemical composition is and the nature of the grading curve to which term *tadelakt* relates. It is precisely this question that this research project is addressing.

Beside the analysis of building materials based on earth and lime to be used in wet areas, ecological and sustainability aspects as well as an evaluation of comfort perception and spatial awareness should be part of the research. The aim is to identify for this purpose measurable and numerically comprehensible, scientifically valid statements that will also stand up to comparative analysis with other building materials.

The result, with regard to terminology, should be an unambiguous nomenclature, which goes on to formulate application scenarios for the building material tadelakt, thus guaranteeing security in use.⁵

This also applies to the future development of technological processes, which will make processing results reproducible and verifiable. For the procedural methods for producing tadelakt, which have largely until now been individually and manually influenced, this is a particular problem that needs clarification.

Emerging from this holistic assessment it is not impossible for the material tadelakt, in combination with the development of mechanical technologies, not only in its original composition but also in its changeable European composition, to strengthen its economic importance for the profiling and protecting of building components in extremely wet locations. Here particularly a contribution could be made to the study of lime as an additive and protective mantle for earth, since it is precisely with the use of earth in wet areas that there are clear limitations due to its hygroscopic characteristics.

Research questions

The proposed research will be pursuing the following questions:

- What is tadelakt, a processing technique or a building material – and what is it composed of?
- How can permanent amalgamation, chemically and physically, between earth and lime be achieved?⁶
- What influence does the technology of creating tadelakt surfaces have on the quality of tadelakt?
- How does the firing process affect the quality of the lime?⁷
- What effect do different sands have on the bonding with an earth render basecoat?⁸

* The research project is being conducted under the guidance of Prof. Dr.-Ing. Henning Bombeck, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Siedlungsgestaltung und ländliche Bauwerke, Universität Rostock, Prof. Dr.-Ing. Ulrich Diederichs, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Bereich Bauingenieurwesen & Kompetenzzentrum Bau MV, Hochschule Wismar, Prof. Dipl.-Ing. Andrea Gaube, Fakultät Gestaltung, Lehrgebiet Stadt- und Gebäudesanierung, Hochschule Wismar



- Welchen Einfluss haben unterschiedliche Sande im Kalkputz auf die Verkrallung mit einem Lehmputzgrund?⁸
- Wie hydrophob ist Tadelakt und ab welcher Risstiefe wird der Putzgrund gefährdet?
- Welche Rolle spielt die Art der Benutzung (Extrembedingung, zyklisch vs. konstant) von hydrophobierten Kalkflächen im Nassbereich?

Chemische Zusammensetzung und bauphysikalische Kennwerte des Tadelakts

In Deutschland hat sich der Begriff *Tadelakt* sowohl für eine Putztechnik als auch für den Baustoff selbst etabliert. Tadelakt wird momentan von drei deutschen Firmen nach eigener Rezeptur nachgemischt⁹ bzw. von mindestens fünf größeren Firmen aus Marokko importiert. Tadelakt kann somit sowohl ein hochhydraulischer, durch den Brennprozess leicht verunreinigter Kalk¹⁰ aus den Bergen in der Umgebung Marrakeschs sein, als auch eine Mischung aus unterschiedlichen, natürlichen Stoffen wie natürlicher hydraulischer Kalk, Weißkalkhydrat, Dolomitmehl, Marmor- und Quarzsand, Tonerde, Cellulose.

Um den Baustoff Tadelakt eindeutig deklarieren zu können, soll in vergleichender Hinsicht die **chemische Zusammensetzung** des trocken gelöschten, pulverförmigen Kalks und des fertigen Putzprodukts jeweils der Abbaugelände Marokkos und aller deutschen Hersteller mittels Röntgendiffraktometer und Rasterelektronenmikroskop untersucht werden.¹¹ Die Ergebnisse der marokkanischen Kalk-Proben sollen anhand geologischer Expertise auf ihre ‚Einzigartigkeit‘ hin bewertet werden.¹² Die vergleichende Analyse von Rohmaterial und fertiger Tadelaktfläche wird vermutlich Aufschluss über die tatsächliche Karbonatisierungsdauer geben und somit darüber, ab wann ein Tadelaktputz als anwendungssicher gilt und ab wann ein Nutzungs- und Gewährleistungsanspruch entstehen kann – ein wichtiger Faktor für Betreiber/Investoren beim nachträglichen Aufbringen von Tadelakt.¹³

Als rein visuelles und unmittelbar anschauliches Verfahren zur Prüfung des Fortschritts der Karbonatisierungsfrente eignet sich bspw. auch der Phenolphthalein-Sprühtest.¹⁴

Um die **bauphysikalischen Eigenschaften** von Tadelakt zu bestimmen, müssen sowohl die Tadelaktflächen als auch die Putzgrün-

de berücksichtigt werden. Folgende Determinanten werden für die zur Ermittlung der Stoffkennwerte durchzuführenden Verfahren zugrunde gelegt:

- **Alter** der Probe
- **Zusammensetzung** des Tadelakts (original marokkanisch oder nach welcher Rezeptur gemischt)
- **Pigmentierung** (welches Pigment, wieviel Gew.-%)
- **Ort** der Herstellung (Deutschland/Marokko)
- **Technologie:** Technik (mit Stein oder Kelle), Material (Verarbeitungskonsistenz), Verfahren (bspw. durch kreisende Bewegung)
- Anzahl der Tadelakt-**Schichten**
- **Erfahrung/Handschrift** des Ausführenden
- **Untergrund** des Tadelakt-Putzes
- **Übergang** Lehmputz-Kalkputz (Kalkschlämme, feucht in feucht, Kammstrich)
- Art der **Hydrophobierung** des Kalkputzes (Seife, Wachs, Anzahl der Applikationen)

Bei allen bislang durchgeführten Versuchen handelt es sich um Vorversuche, die in ihrem Aufbau jeweils nach der am ehesten entsprechenden DIN durchgeführt wurden. Die vorgegebene Anzahl der Probekörper wurde bislang nicht in allen Testreihen eingehalten, da das Hauptaugenmerk vorerst auf der breiten Streuung der Ergebnisse durch möglichst unterschiedliche Prüfkörper lag, um Reaktions-Tendenzen abzuschätzen.

Nach Auswertung der ersten Testreihen kann bereits festgestellt werden, dass fast alle gewählten Prüfverfahren hinsichtlich der klimatischen Extrembedingungen, auf die hin Tadelakt geprüft werden soll, modifiziert werden müssen. Ein wesentlicher Schritt ist daher, sich auf die Suche nach anerkannten Prüfverfahren zu machen, bzw. diese für das Anwendungsszenario zu entwickeln.

Bislang erfolgten Versuchsreihen zur Prüfung der:

- Haftfestigkeit von Kalkputzen auf Lehmuntergründen¹⁵
- Wasseraufnahme von Tadelakt¹⁶
- Wasserdampfdurchlässigkeit von Tadelakt auf verschiedenen Untergründen¹⁷
- Eindringung der Seife in Tadelakt
- Benetzungswinkel/Oberflächenspannung von verseiften Kalkflächen

1 Tadelakt-Probe 3 auf grobem Lehmputz
1 Tadelakt Sample 3 on coarse earth render

2 Tadelakt-Probe 1 auf Lehmbauplatte
2 Tadelakt Sample 1 on clay building board



- How hydrophobic is tadelakt and at what depth of cracking is the plaster basecoat endangered?
- What role does the type of application (extreme conditions, cyclic vs. constant) of hydrophobic lime surfaces play in wet areas?

Chemical composition and physical characteristics of tadelakt

In Germany the name *tadelakt* has established itself not only as a plastering technique, but also as a building material. Tadelakt is currently produced by three German firms to their own recipes⁹ and is also imported from Morocco by at least five large firms. Tadelakt can either be a highly hydraulic lime, slightly contaminated by the firing process,¹⁰ from the hills in surrounding Marrakech or a mixture of different, natural substances like natural hydraulic lime, white hydrated lime, dolomite powder, marble and quartz sand, clay and cellulose.

To be able to declare tadelakt unambiguously from a comparative viewpoint, the *chemical composition* of the dry-slaked pulverised lime and the pre-prepared plaster product, both from the quarrying region in Morocco and that from all the German manufacturers should be scanned with an X-ray diffraction analyzer and a scanning electron microscope.¹¹ The results of the Moroccan lime samples should be evaluated by geological experts to ascertain their ‘uniqueness’.¹² The comparative analysis of the raw material and completed tadelakt surface is evidently deducible by information regarding the actual duration of carbonation, which will indicate whether the tadelakt plaster is safe to use and from when it is fit to use and guaranteeable – an important factor for the user/investor especially if the tadelakt is applied retrospectively.¹³

As a purely visual and immediately demonstrative procedure for testing the progress of carbonation a phenolphthalein spray test is also suitable, for example.¹⁴

To determine the *physical characteristics* of tadelakt both the tadelakt surfaces and the plaster base must be taken into account. The procedures for identifying the material are based on the following determining factors, which are used for parameters:

- *Age* of the sample
- *Composition* of the tadelakt (original Moroccan or to whatever recipe it has been mixed)
- *Pigmenting* (which pigment and weight/%)
- *Location* of manufacture (Germany/Morocco)
- *Technology*: Technique (with stone or trowel), material (application consistency), procedure (e.g. a rotary movement)
- Number of tadelakt *layers*
- *Experience/personal style* of the plasterer
- *Plaster base* of the tadelakt plaster
- Earth/lime plaster *interface* (lime slurry, wet in wet, combed key)
- Method of *hydrophobising* the lime plaster (soap, wax, number of applications)

All investigations undertaken to date have been preliminary tests, which were carried out in the manner of the most closely corresponding DIN. The predetermined number of test samples has not always been met in all the test series because the main focus of attention was initially on the broad scattering of results from the, as far as possible, different test samples in order to estimate the reaction tendencies.

After evaluating the first test series it could already be established that almost all the chosen test procedures have to be modified to accommodate the extreme climatic conditions for which the tadelakt was to be tested. An important step therefore is to search for recognised test procedures or to develop these for the application scenario.

So far test series have been carried out for testing:

- Adhesive strength of lime plaster on earthen plaster bases¹⁵
- Water absorption of tadelakt¹⁶
- Water vapour permeability of tadelakt on various backgrounds¹⁷
- Penetration of soap into tadelakt
- Wetting angle/surface tension of saponified lime surfaces

This paper is confined to the presentation of the results of the first completed tests for adhesive strength and water absorption.¹⁸

3 Der Kalkputz hat sich im gelöcherten Lehmputz ‚verankert‘

3 The lime plaster ‘anchors’ itself into the perforated earth render

4 Kalkputz auf Lehmputzgrund, Kohäsionsbruch mittig im Lehm-Untergrund

4 Lime plaster on earth plaster base; cohesion failure at centre of earth plaster base

Probe- fläche	Int. Nr.	Putzgrund	Putz	β_{HF} N/mm ²	Einstufung/Bemerkung	Alter Kalk	
1	4	Lehmbauplatte (Lehm, Schilf, Jute) 18 mm	Tadelakt 5% Umbra grün hell, 2-lagig	0,034	Kohäsionsbruch (Kraterförmiger Abriss mitten in Lehmbauplatte oberhalb Schilf)	10 Wochen	
2				0,020			
3	10	Lehmoberputz grob 5 mm	Tadelakt 10% Ocker rot, 2-lagig	0,78	Kohäsionsbruch (Flächig gleichm. Abriss in Lehmputz kurz unterh. Tadelakt)	9 Wochen	
4	A	Lehmbauplatte	Kalkhaftputz, fein	0,028	Kohäsionsbruch (Kraterförmiger Abriss mitten in Lehmbauplatte oberhalb Schilf)	1 Woche	
5				0,031			
6				0,032			
7	B	Lehmunterputz 5 mm auf Fermacell	Kalkhaftputz, fein	0,133	80% Bruch mitten im Lehmputz 20% Adhäsionsbruch zu Fermacell/ Lehmputz	1 Woche	
8				0,091			20% Bruch mitten im Lehmputz 80% Adhäsionsbruch zu Fermacell/ Lehmputz
9	C	Lehmunterputz 5mm	Kalkglätte unpoliert 2-lagig	0,35	Kohäsionsbruch (Flächig gleichm. Abriss in Lehmputz kurz unterh. Tadelakt)	2 Wochen	
10	D	Lehmoberputz 5 mm Vorgenässt	Kalkhaftputz, fein	0,057	Kohäsionsbruch mittig im Lehmputz	3 Wochen	
11				0,062			Kohäsionsbruch mittig im Lehmputz
12				0,051			Kohäsionsbruch mittig im Lehmputz
13				0,065			Kohäsionsbruch im Lehmputz, Kalkkörnung ist in Löchern sichtbar

Tabelle 1: Haftfestigkeit von Kalkputzen auf Lehm

Dieser Beitrag beschränkt sich auf die Darstellung der Ergebnisse der ersten abgeschlossenen Versuche zur Haftfestigkeit und zur Wasseraufnahme.¹⁸

Um nicht von zu vielen Reaktionsvariablen auszugehen, wurden die ersten Proben aus je den gleichen Materialien einer Firma hergestellt.

Tadelakt (dt. Nachbauprodukt): natürlicher hydraulischer Kalk, kornabgestufte Quarzsande, Marmormehle, Tone, Asche, Diatomeenerde, Cellulose

Kalkhaftputz: Marmorkörnung, Quarzsande, Marmorkalkhydrat, Cellulose, Porzellanerde

Lehmunterputz: Natur-Baulehm, gemischtkörniger gewaschener Sand 0-2 mm, Gerstenstroh 30 mm

Lehmoberputz grob: Natur-Baulehm, gemischtkörniger gewaschener Sand 0-2 mm, Gerstenstroh 10 mm

Glätteseife: Olivenölseife, Kalksinterwasser, Kieselsäure

Schwarze marokkanische Seife: reine Kaliseife aus Olivenöl

Für die Ermittlung der bauphysikalischen Eigenschaften von Tadelakt kommt erschwerend der Umstand hinzu, dass die 2-5 mm starke Kalkschicht immer einer in sich absolut steifen Trägerplatte bedarf, um hergestellt zu werden. Als Trägerplatten dienten bislang: Fermacell, Lehmbauplatte, Calciumsilikat

Bestimmung der Haftfestigkeit¹⁹ von Kalkputzen auf Lehm

Versuchsdurchführung

Um die Haftung von Kalkputzen auf Lehmuntergründen zu bestimmen, wurden Tadelakt- und Kalkputzproben auf unterschiedlichen Trägerplatten und Unterputzen für die Prüfung mittels Haftzugprüfgerät anhand eines Kernbohrers präpariert. Die Probestellen wichen nicht nur in der Baustoffkombination, sondern auch in der Ausführung des Schichtaufbaus voneinander ab. So waren einige Lehmuntergründe vorgemischt, andere mit einem engen Rautenstrich oder durch eine Löcherung per Nagelbrett aufgeraut, um dem Kalkputz eine bessere Verkrüftung zu ermöglichen. Bereits beim Ausbohren der Prüfstempeflächen zeigten die einzelnen Materialkombinationen unterschiedliche Ergebnisse bezüglich der Präzision der Bohrung, Abplatzungen am Rand, Unterhohlungen und Verfärbung der Putzschicht.

Ergebnisse und Schlussfolgerung

Bis auf die Tadelakt-Proben auf den in sich inhomogenen und weichen Lehmbauplatten weisen alle Materialproben eine Haftfestigkeit β_{HF} von $> 0,05$ N/mm² auf und liegen somit z. B. über der geforderten Mindesthaftfestigkeit ($\geq 0,03 - \geq 0,05$ N/mm²)

Sample surface	Int. No.	Plaster base	Plaster	β_{HF} N/mm ²	Classification/comments	Age of lime	
1	4	Clay building board (Earth, reeds, jute), 18 mm	Tadelakt 5% Umbra green light, 2-layered	0.034	Cohesion failure (Crater-shaped break in centre of clay building board above reeds)	10 weeks	
2				0.020			
3	10	Earth finishing coat, coarse 5 mm	Tadelakt 10% ochre red, 2 layered	0.78	Cohesion failure (Full area regular break in earth plaster immed. below Tadelakt)	9 weeks	
4	A	Clay building board	Lime bonding plaster, fine	0.028	Cohesion failure (Crater-shaped break in centre of earth building board above reeds)	1 week	
5		Clay building board (pre-wetted)		0.031			
6		Clay building board		0.032			
7	B	Earth render coat 5 mm on Fermacell	Lime bonding plaster, fine	0.133	80% failure medial to lime pl. 20% adhesion failure to Fermacell/earth plaster	1 week	
8		Earth render coat 5mm pre-wetted on Fermacell		0.091			20% failure centre of lime pl. 80% adhesion failure to Fermacell/earth plaster
9	C	Earth render coat 5 mm	Lime skim unpolished 2-layered	0.35	Cohesion failure (Full area regular break in earth plaster immed. below Tadelakt)	2 weeks	
10	D	Earth finishing coat, 5 mm, pre-wetted	Lime bonding plaster, fine	0.057	Cohesion failure medial to lime plaster	3 weeks	
11		Pre-wetted + trowel-cut key		0.062			Cohesion failure medial to lime plaster
12		Pre-wetted + trowel-cut key		0.051			Cohesion failure medial to lime plaster
13		Perforated with nail-board		0.065			Cohesion failure in earth plaster, lime granulation visible in holes

Table 1: Adhesive strength of lime plasters on earth

In order not to rely on too many reaction variables, the first tests were performed on the same materials produced by the same firms.

Tadelakt (the German reproduced product): natural hydraulic lime, graded quartz sands, pulverised marble, clays, ashes, diatomaceous earth, cellulose.

Lime bonding plaster: granular marble, quartz sands, marble lime hydrate, cellulose, china clay.

Earth plaster base: natural building earth, mixed grain-size washed sand 0-2 mm, barley straw 30 mm.

Earth finishing plaster: natural building earth, mixed grain-size washed sand 0-2 mm, barley straw 10 mm.

Polishing soap: olive oil soap, lime-sintered water, silica.

Black Moroccan soap: pure potassium soap from olive oil.

To establish the construction-physical characteristics of tadelakt, the added complication arises that application of the 2-5 mm thick lime layer always requires an absolutely stiff sub-structure.

For supporting surfaces Fermacell, clay building boards and calcium silicate have been used in the past.

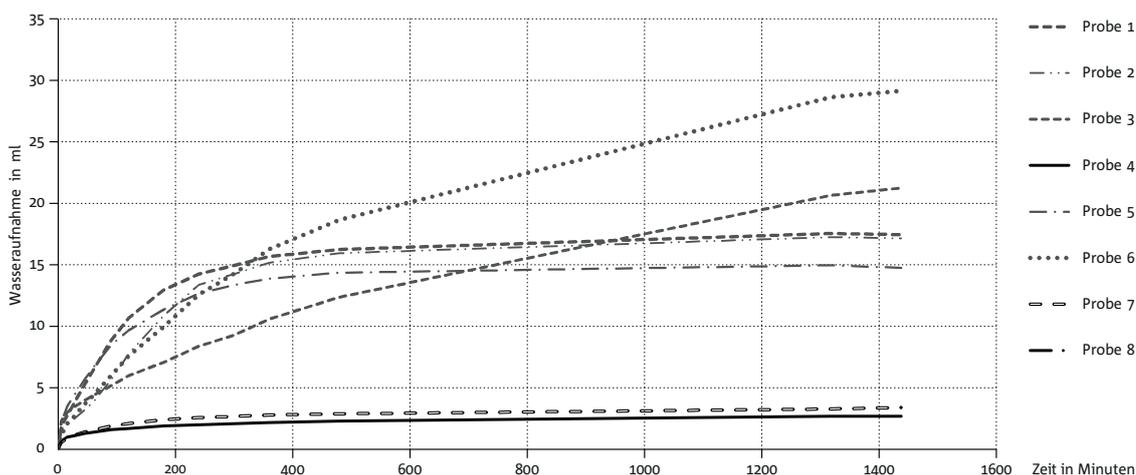
Establishing the adhesive strength¹⁹ of lime plasters on earth

Test procedure

To establish the adhesive strength of lime plasters on an earth plaster base, tadelakt on lime plaster samples on different supporting boards and plaster bases were prepared for the test-susings an adhesive strength testing device together with a core drill. The test surfaces differed not only in their building material structure, but also in method used for building up the layers. Some earth plaster bases were pre-wetted; others were given a criss-cross trowel-cut key or roughened up with perforations formed with a nail board, in order to facilitate adhesion of the lime plaster. During the drilling out of the test stamp surfaces the individual material combinations already gave different results with regard to the precision of the drilling, flaking at the edges, cavity formation and discolouration of the plaster layer.

Results and conclusions

Apart from the tadelakt samples on inhomogeneous and soft earth building boards, all material samples demonstrated an adhesive strength of $\beta_{HF} > 0.05$ N/mm² and were therefore above the required minimum adhesive strength ($\geq 0.03 - \geq 0.05$ N/mm²)



von Lehmputzen zum Untergrund und zwischen den Putzlagen.²⁰ Für Kalkputz-Mörtel geben Dettmering/Kollmann 0,1-0,2 N/mm² an.²¹ Diese Werte konnten durch Proben 3, 7 und 9 bestätigt bzw. deutlich übertroffen werden.

Probe 13 zeigt ein ähnliches Bruchbild, wie es Volhard bei der Analyse historischer Strohlehme beschreibt: in den feuchten Lehmputz gedrückte, gröbere Zuschläge des Kalkputzes, die zu einer sehr guten Haftung führen.²² Bei Probe 13 handelt es sich bei den weißen Punkten um Kalkputz, der partiell in den gelöcherten Lehmputz eingedrungen ist.

Grundsätzlich kann bereits festgestellt werden, dass jeweils die Putzgründe bzw. die Haftung von Lehm auf seinem Putzgrund versagen, nicht aber die direkte Verbindung zwischen Kalk und Lehm. Dies widerspricht den überwiegend warnenden Beschreibungen der ungenügenden Haftung zwischen Lehm und Tadelakt in der Fachliteratur.

Je nach ermittelten μ -Werten (Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor) der Tadelaktflächen wird sich zeigen, inwieweit der Putzgrund durch kontinuierlich/zyklisch eindringende Feuchte gefährdet ist. Dementsprechend müssen erneut Haftfestigkeitsprüfungen an Tadelakt-Putzen erfolgen, die extremen Klimabedingungen ausgesetzt waren.

Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten²³ von Tadelakt

Versuchsdurchführung

Für den ersten Tauchversuch wurden acht unterschiedliche Tadelaktflächen aus größeren Probetafeln ausgebohrt und seitlich mit Paraffin abgedichtet. Die acht Proben unterscheiden sich in folgenden Parametern:

- Alter (zwischen 6 und 16 Wochen)
- Pigmentierung (8-10% und Überpigmentierung)
- Anzahl des Verseifungs-Vorgangs (1× bis 3×)
- Putzgrund (Fermacell, Kalkhaftputz, Lehmoberputz, Calciumsilikat)

Bereits bei der Probenpräparation zeigten sich interessante Details der einzelnen Schichtaufbauten:

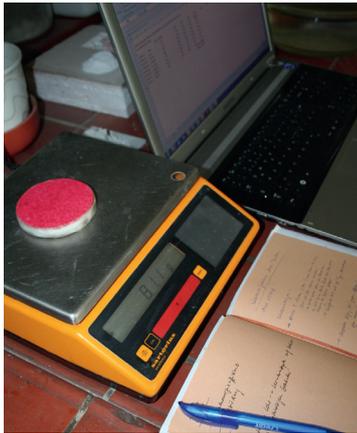
Ältere Proben zeigen nach dem Bohren ein wesentlich feineres Schnittbild. Die durch Reibung beim Bohren erzeugte Wärme macht die Restfeuchte im Tadelakt sichtbar. Kurz nach dem Bohrvorgang sind die Außenränder der jüngeren Proben dunkel verfärbt, das Bohrmehl klebt auf den feuchten Stellen fest. Ältere Proben zeigen diese Verfärbung nicht oder nur sehr minimal. Die Proben wurden über 24 Stunden bei einer Raum-/Wassertemperatur von 20°C in eine flache, wassergefüllte Prüfschale

Tabelle 2: Auswertung des Tauchversuchs (F = Fermacell, LO = Lehmoberputz, KH = Kalkhaftputz, C = Calsitherm, SS = schwarze Seife, GS = Glätteseife)

Probe-Nr.	fläche intern	Pigmentierung	Tadelakt-Schichten	Putzgrund	Seife	Anzahl der Seifungen	Alter der Probe	wt	Definition
1	13	5% Spinellblau, 5% Umbra gr. dkl	2	F, KH fein	SS	1×	9 Wochen	1,8137	hemmend
2	21	10% Umbra grünlich	2	F	GS	1×	6 Wochen	1,9124	hemmend
3	14	10% Umbra grün hell	2	F, LO, KH fein	SS	1×	8 Wochen	0,9657	hemmend
4	14	10% Umbra grün hell	2	F, LO, KH fein	SS	2×	8 Wochen	0,0836	abweisend
5	12	8% Eisenoxid rot 140	2	F, KH grob	SS	2×	8 Wochen	1,2800	hemmend
6	19	10% Ocker rot	3	C	GS	1×	6 Wochen	1,7027	hemmend
7	1	Orientrot, überpigmentiert	2	F, KH fein	GS	2×	16 Wochen	0,0489	abweisend
8	1	Orientrot, überpigmentiert	2	F, KH fein	GS	3×	16 Wochen	0,0815	abweisend

5 Wasseraufnahme bei teilweisem Eintauchen: Nur Tadelakt-Proben 4, 7 und 8 können nach DIN 4108-3 als ‚wasserabweisend‘ bezeichnet werden

5 Water uptake when partially immersed: Only tadelakt samples 4, 7 and 8 can be designated ‚water repellent‘ according to DIN 4108-3



for earth plasters to the plaster base and between the plaster layers.²⁰ For lime plaster mortar Dettmering/Kollmann specify 0.1–0.2 N/mm².²¹ These values were confirmed or even substantially exceeded in tests 3, 7 and 9.

Test 13 produced a similar failure pattern, as Volhard describes in the analysis of historic straw-earth examples: Coarse additives of lime-plaster are pressed into the earth plaster, which result in very good adhesion.²² In Test 13 the white spots were lime plaster partially penetrating into the punctured earth plaster.

It was categorically established that in each case the plaster base or the bond between the earth and the plaster base fails, but not the direct bond between lime and earth. This contradicts the largely cautionary report of insufficient adhesion between earth and tadelakt in the technical literature.

Depending on the established μ -values (water vapour diffusion resistance factor), the tadelakt surfaces will show to what extent the plaster base is endangered by continuously/cyclically penetrating moisture. Accordingly the adhesive strength tests on tadelakt plasters must be repeated if they are to be subjected to extreme climatic conditions.

Establishing the water absorption coefficient²³ of tadelakt

Test procedure

For the first experimental test eight different tadelakt surfaces were drilled from large test panels and sealed round the edges with paraffin. The eight samples differed according to the following parameters:

- Age (between 6 and 16 weeks)
- Pigmentation (8-10% and over pigmentation)
- Number of saponification operations (1× to 3×)
- Plaster base (Fermacell, lime bonding plaster, earth finishing plaster, calcium silicate)

During preparation of the tests the individual layer structures already demonstrated interesting details:

Older samples had much sharper cut edges after drilling. The friction-generated warmth during drilling rendered the residual moisture in the tadelakt visible. Shortly after the boring procedure the outer margins of the younger samples discoloured; the drilling dust stuck firmly to the damp areas. Older samples did not usually have this discolouration or if they did, then only minimally.

Table 2: Evaluation of the immersion test (F = Fermacell, LF = Lime finishing, LB = Lime bonding, C = Calsitherm, BS = Black soap, PS = Polishing soap)

Test	No. surface intern	Pigmentation	Tadelakt layers	Plaster base	Soap	Saponifications	Age of sample	ωt	Definition
1	13	5% spinel blue, 5% umbra dk gr.	2	F, LB fine	BS	1×	9 weeks	1.8137	resistent
2	21	10% Umbra greenish	2	F	PS	1×	6 weeks	1.9124	resistent
3	14	10% Umbra light green	2	F, LF, LB fine	BS	1×	8 weeks	0.9657	resistent
4	14	10% Umbra light green	2	F, LF, LB fine	BS	2×	8 weeks	0.0836	repellent
5	12	8% iron oxide red 140	2	F, LB coarse	BS	2×	8 weeks	1.2800	resistent
6	19	10% ochre red	3	C	PS	1×	6 weeks	1.7027	resistent
7	1	Orient red, over-pigmented	2	F, LB fine	PS	2×	16 weeks	0.0489	repellent
8	1	Orient red, over-pigmented	2	F, LB fine	PS	3×	16 weeks	0.0815	repellent

6 Wasseraufnahme bei teilweisem Eintauchen – Gewichtskontrolle der Tadelakt-Proben

6 Water uptake when partially immersed – weight control of the tadelakt samples



auf kleine Abstandshalter gelegt, sodass sie von Wasser unter-spült werden können und mit jeweils 5 mm ins Wasser eintauchen. In vorgegebenen Zeitabständen wurden sie gewogen.

Der Wasseraufnahmekoeffizient w wurde nach der Formel $w = \text{kg}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}$ berechnet.

Ergebnisse und Schlussfolgerung

In Anbetracht des Diagramms scheinen sechs Proben bereits nach acht Stunden annähernd den Grad der vollständigen Sättigung erreicht zu haben. Ein Wasserdurchtritt war jedoch auch nach 24 Std. bei keiner Probe erkennbar! Lediglich Probe 6 und 3 haben bis zur 24-Std.-Marke weitere Feuchtigkeit aufgenommen, wobei am Paraffin-Rand der Probe 3 eine kleine Undichtigkeit (dunkle Verfärbung der Fermacell-Platte) festgestellt werden musste.

Einfach geseifte, jüngere Tadelakt-Flächen verfärben sich nach wenigen Minuten im Tauchbad homogen dunkel. Die mehrfach geseiften Tadelakt-Flächen bekommen erst nach mehreren Stunden fleckige Verdunkelungen ihres jeweiligen Farbtons.

Wenn wir trotz der o.g. Unklarheiten und Abweichungen bzgl. der Bezeichnungen von Eigenschaften vorerst nach DIN 4108-3 bewerten, können nur drei von acht Proben als *wasserabweisend* bezeichnet werden, fünf als *wasserhemmend* (vgl. Tab. 2).

Für hydrophobe Putze wie Tadelakt wäre eine exaktere Unterteilung bzw. eine weitere genormte Abstufung der Werte $w < 0,5 \text{ kg}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}$ sinnvoll.

Die beiden ältesten Proben bzw. die mehrfach (und frisch) geseiften Flächen sind somit am stärksten wasserabweisend. Die Notwendigkeit der Vereinheitlichung der Titulierungen des Grades der Hydrophobierung bzgl. des Beginns der Gewährleistungssicherheit für die ‚gebrauchsfertige‘ Tadelaktfläche und den Einsatzort zeigt sich hier z. B. besonders deutlich.

Um die Wasseraufnahme von Tadelakt unter Extrembedingungen wie im Dampfbad zu testen, müssten zwei Parameter der DIN EN ISO 15148 folgendermaßen abgewandelt werden:

- Wassertemperatur 40-50 °C statt laut DIN 18-28 °C
- Wasserdruck 3-5 bar statt laut DIN 0,0005 bar.

Die geforderte Eintauchtiefe von 5 mm entspricht einem Wasserdruck von 0,0005 bar und ist nicht ansatzweise mit extremem Wasserdruck wie z. B. durch einen Duschstrahl vergleichbar.

Fazit und Ausblick

Bauphysikalische Untersuchungen

In Kooperation mit verschiedenen Forschungseinrichtungen sollen herkömmliche Verfahren hinsichtlich ihres Nutzens für die vorbezeichneten Baustoffe getestet, beschrieben und evtl. verifiziert werden.

Die geplanten, vergleichenden Haftfestigkeitsprüfungen für Kalkputze auf Lehmputzgründen werden Aufschluss darüber geben, in welchem Umfang die Haftung der beiden Baustoffe durch folgendes verstärkt werden kann:

- Vergrößerung der Verkrallungsfläche (Rautenstriche, Lochung mit Nagelbrett etc.)
- Zusatz von Tierhaaren im Kalk bzw. von Stroh im Lehm²⁴
- eine erzwungene Verkieselung zwischen Lehm und Kalk durch kalkhaltigen Lehm²⁵ und tonmineralhaltigen Kalk (Kalkmergel)

Auch die zur Verseifung additive Applikation einer Wachsschicht soll bezüglich ihrer Auswirkung auf die bauphysikalischen Kennwerte des Tadelakts eingehend untersucht werden.

Hinsichtlich des Primärenergieinhalts (PEI) von deutschem Tadelakt ist es immer noch nachhaltiger, auf die Atmungsaktivität eines Kalkputzes zu verzichten, als für Nassbereiche auf wesentlich energieaufwändigere Baustoffe wie Zement oder künstliche Baustoffe auf Basis synthetischer Polymere zurückzugreifen.

Es ist avisiert, nach Abschluss der Messreihen einen 1:1-Versuch in der Dreifach-Klimakammer²⁶ des Kompetenzzentrums Bau MV durchzuführen, um den originalen Wandaufbau des marokkanischen Dampfbades zu simulieren.

Ethnografische und geologische Untersuchungen

Anhand einer Feldstudie in Marokko zur Materialbeschaffenheit des Tadelakts soll eine Karte der jetzigen und historischen Kalk-Abbaugelände erarbeitet und nach den vorbezeichneten Gesichtspunkten Kalk-Proben analysiert werden.

7 Ergänzende Versuche mit dem Karsten'schen Röhrchen auf 16 Wochen alter Tadelakt-Probe

7 Supplementary test with the Karsten Tube on a 16-week-old tadelakt sample

8 Ergänzende Versuche in einer Dusche, die seit über einem Jahr regelmäßig benutzt wird

8 Supplementary test in a shower, which has been regularly used for more than a year

The samples were laid for 24 hours at a room/water temperature of 20 °C in a water-filled immersion bath on small distance pieces, so that they could be saturated and then immersed in each case 5 cm into the water. At predetermined time intervals they were weighed. The water absorption coefficient w was calculated according to the formula $w = \text{kg}/\text{m}^2\text{h}^{0.5}$.

Results and conclusions

According to the diagram six of the samples seemed to have already reached the stage of complete saturation after eight hours. Indeed further water penetration was discernable in none of the samples after 24 hours! Just Samples 6 and 3 were still absorbing moisture up to the 24 hour mark, though at the paraffin margin of Sample 3 a small leakage (dark discolouration in the Fermacell panel) was identified.

Simply saponificated, younger tadelakt surfaces showed dark homogenous discolouration within a few minutes of placement in the immersion bath. The several-times saponificated tadelakt surfaces only develop dark flecks in their respective colours after several hours.

If we first evaluate in accordance with DIN 4108-3, in spite of the above-mentioned ambiguities and deviations in respect of the descriptions of characteristics, we can declare only three of the eight samples as *water repellent* and five as *water resistant* (see Table 2).

For hydrophobic plasters like tadelakt a more exact breakdown or a further standardised increment of the $w < 0.5 \text{ kg}/\text{m}^2\text{h}^{0.5}$ values would make sense.

The two oldest samples or the surfaces that were saponificated several times (and in a fresh condition) were those that were the most water repellent.

The necessity of a unified designation of the grades of hydrophobation with regard to the start of guaranteed security for the 'ready-to-use' tadelakt surface and its location is clearly demonstrated here, for example.

To test the water uptake of tadelakt under extreme conditions, for example in a steam bath, two parameters of DIN EN ISO 15148 must be modified as follows:

- Water temperature 40-50 °C instead of 18-28 °C according to DIN
- Water pressure of 3-5 bar instead of the 0.0005 bar required by the DIN.

The required immersion depth of 5 mm represents a water pressure of 0.0005 bar and is not for the most part comparable with the extreme water pressure produced e.g. by a shower jet.

Summary and outlook

Building physics research

In co-operation with various research establishments, conventional procedures should be tested, described and possibly verified regarding their usefulness for the previously described building materials.

The planned comparative adhesive strength tests for lime plasters on earth plaster bases would provide information on the extent to which the adhesion of both materials could be strengthened by the following:

- Enlargement of the bonding surface area (criss-cross trowel cuts, perforation with nail-board etc.)
- Introducing animal hair into the lime or of straw into the earth²⁴
- Forced silification between earth and lime with earth containing lime²⁵ and lime containing clay minerals (calcareous marl).

The added application of a wax coating for saponification should be thoroughly examined for its effect on the physical parameters of tadelakt.

Regarding the primary energy input (PEI) of German tadelakt, it would still be more sustainable to dispense with the breathability of a lime plaster than to resort for wet areas to much more energy intensive materials such as concrete or artificial building materials based on synthetic polymers.

It has been announced that after completing the test series a test will be performed in the three-fold climatic chamber²⁶ at the Kompetenzzentrum Bau MV, in order to simulate the original wall structure of the Moroccan steam bath.

Desweiteren sollen in stochastisch-statistischer Hinsicht unterschiedlich datierte Tadelaktflächen untersucht werden.

Darüber hinaus werden die (vermutlich von Maâlem²⁷ zu Maâlem unterschiedlichen) Technologien der Verarbeitung untersucht und in vergleichender Hinsicht zur hiesigen Putztechnik beschrieben.

Raumwahrnehmung und Gesundheit

Es ist avisiert, in Zusammenarbeit mit dem Institut Farbe.Design. Therapie, dem Fachbereich Lighting Design der Hochschule Wismar und dem Bereich der Emotionsforschung des Fraunhofer Instituts IGD Rostock, numerisch bestimmbare Gradienten des Wohnfühlers hinsichtlich unterschiedlicher Haptik und Farbigkeit des Tadelakts im Vergleich zu artifiziellen Baustoffen zu erarbeiten.

- 1 Vgl. Schroeder, H., Volhard, F., Röhlen, U., Ziegert, C., Die Lehm-Bau Regeln 2008 – 10 Jahre Erfahrungen mit der praktischen Anwendung, S. 12, in: Tagungsbeiträge der 5. Internationalen Fachtagung für Lehm-Bau, Hrsg.: Dachverband Lehm e.V., Weimar, 2008
- 2 Nur 8 % des heutzutage entstehenden Bauschutts sind recycelbar – der Rest landet auf der Deponie; Ratgeber Bauen und Wohnen, Dämmstoff-Recycling, ARD, Sendung v. 20.5.2012
- 3 Auch Dampfbäder zählen zum Oberbegriff Sauna. Im Dampfbad herrschen Temperaturen zwischen 55 und 70°C bei einer Luftfeuchte von bis zu 95 %
- 4 Zur Beschreibung von Tadelakt benutzt die Firma Kreidezeit die Begriffe wasserbeständig und wasserabweisend; Kreidezeit: Produktbroschüre Tadelakt, o.J., o.O. Fromme/Herz beschreiben den Kalk-Glanzputz als wasserfest; Fromme, I., Herz, U., Lehm- und Kalkputze, 2012, Staufen bei Freiburg, S. 137. Ochs bezeichnet Tadelakt als wasserundurchlässig; Ochs, M.J., Tadelakt, 2007, München, S. 52. Nach DIN 4108-3 wird zwischen wasserhemmend und wasserabweisend unterschieden. Klopfer u. A. unterteilt in noch eine weitere Wasseraufnahmeklasse: wasserundurchlässig ab $w \leq 0,001 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h} \cdot 0,5$. Davon abweichend gibt Weber den für die Klassifizierung hydrophober Putze sehr entscheidenden Übergang von wasserabweisend zu wasserundurchlässig mit $w < 0,1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h} \cdot 0,5$ an. Klopfer, H., u. A., Lehrbuch der Bauphysik, 1997, Stuttgart, S. 354. Weber, H., Kompetenzzentrum Bautenschutz und Bausanierung, www.kbb-weber.de/files/Wasseraufnahme.pdf (8.7.2012) DIN EN 1062-3 wiederum unterscheidet drei Wasserdurchlässigkeitsraten: hoch, mittel und niedrig (Klasse I-III)
- 5 Langfristig soll hydrophobierter Kalkputz wie Tadelakt als volldeklariertes Baustoff in Zusammenarbeit mit dem DIBt in die Musterliste der technischen Baubestimmungen bzw. in die Bauregelliste aufgenommen werden.
- 6 Nach DIN EN 13914-1 sollte die erste Putzlage weicher sein als der Putzgrund und jede nachfolgende Lage sollte nicht fester sein, als die auf die sie aufgetragen wird. Da Tadelakt nach Abschluss des Verarbeitungsprozesses mit der Zeit wieder zu Kalkstein auskarbonatisiert, kann dieser Regel nicht gefolgt werden. Bezüglich des geeigneten Putzgrundes für Tadelakt weicht die Literatur stark voneinander ab. Wird grundsätzlich vor der Schalenbildung durch ungenügende Haftung von Kalk auf Lehm aufgrund der unterschiedlichen Abbindungsprozesse gewarnt, so bestätigt Ochs Lehm als guten Putzgrund; Ochs, M.J., Tadelakt, 2007, München, S. 14, 44, 107. Auch Fromme/Herz

- empfehlen neben Beton, Stein und Kalk-Zement ebenfalls Lehm für den aus Marokko importierten Kalk-Glanzputz – jedoch mit ausreichender Vornässung und vorheriger Verfestigung durch Wasserglas; Fromme, I., Herz, U., Lehm- und Kalkputze, 2012, Staufen bei Freiburg, S. 137
- 7 Schon Du Vignon (1766), De Ramecourt (1768) und Cederhielm (1785) haben praktische Hinweise zur Verbesserung der Güte, Kontinuität und Wirtschaftlichkeit des Brennprozesses gegeben. Vgl. dazu Foroutan, H., Historische Putze, Diplomarbeit, 1998, Wien, S. 12
 - 8 Foroutan geht ausführlich auf die unterschiedlichen Sande nach Herkunft, Qualität und gesteinskundlichen Aspekten und auf die unterschiedlichen Kalkarten ein. Foroutan, H., Historische Putze, Diplomarbeit, 1998, Wien, S. 24-54
 - 9 Casa Natura, Christian Kern, Kreidezeit Naturfarben GmbH
 - 10 Zusammensetzung von marokkanischem Tadelakt nach Ochs: etwa 95% gebr. Kalkstein, 5% Sand, Lehm, Asche (die beim Brennvorgang vor Ort entsteht); Ochs, M. J., Tadelakt, 2007, München, S. 28.
 - 11 In Zusammenarbeit mit dem Fachbereich Bauingenieurwesen der Hochschule Wismar, Prof. Malorny
 - 12 Handelt es sich bei dem marokkanischen Kalkvorkommen um eine geologisch einzigartige Materialbeschaffenheit oder um einen ethnologisch bedingten Zufall?
 - 13 Die Belastbarkeit von Tadelakt wird von der Fa. Kreidezeit mit ca. 4 Wochen angegeben – die endgültige Aushärtung mit ca. 6 Monaten; www.kreidezeit.de/Produktinformationen/PDFs_Datenblaetter/Tadelakt.pdf. (10.7.2012) Ochs empfiehlt für wasserhaltende Becken eine Wartezeit von einer Woche, für Böden und Kaminöfen einen Monat; Ochs, M.J., Tadelakt, 2007, München, S. 50 Höpfer gibt eine Karbonatisierungsfront von 10mm/Jahr an. Für einen 2-lagig ausgeführten Tadelakt mit einer Gesamtstärke von 2,5-5 mm beträgt die vollständige Karbonatisierung folglich zwischen 3 und 6 Monaten; Höpfer, N., Kalkputzregeln, 2011, <http://romankalk.webs.com/links.htm> (23.6.2012)
 - 14 Phenolphthalein reagiert mit alkalischen Medien ($\text{pH} > \text{ca. } 10$) durch einen violetten Farbumschlag. Man nutzt es in alkoholischer Lösung zum anschaulichen Nachweis der Karbonatisierung von Beton, indem eine frische Bruchfläche mittels Sprühflasche angefeuchtet wird.
 - 15 DIN EN 1015-12
 - 16 DIN EN ISO 15148 und Verfahren nach Karsten
 - 17 DIN EN ISO 12572, dry- und wet-cup-Versuche
 - 18 Die bereits begonnenen Testreihen zur Bestimmung der bauphysikalischen Kennwerte von verdichtetem und verseiftem Kalkputz werden an der Hochschule Wismar in Zusammenarbeit mit dem KBauMV (Kompetenzzentrum Bau) bis 2014 durchgeführt.
 - 19 DIN EN 1015-12
 - 20 Der Richtwert für die Haftfestigkeit von Lehmputzmörteln auf Betonplatten und innerhalb der Putzschichten liegt in der normalen Anwendung bei $\geq 0,05 \text{ N/mm}^2$, für untergeordnete Räume bei $\geq 0,03 \text{ N/mm}^2$; Dachverband Lehm e.V., Anforderungen an Lehmputze, TM 01, 2008, Weimar, S. 5
 - 21 Nach Röhlen, U., Ziegert, C., Lehm-Bau-Praxis, 2010, Berlin, S. 34
 - 22 Vgl. Volhard, F., Lehmausfachungen und Lehmputze, 2010, Stuttgart, S. 76
 - 23 DIN EN ISO 15148
 - 24 Volhard, F., Lehmausfachungen und Lehmputze, 2010, Stuttgart, S. 76
 - 25 Schroeder erwähnt Wüsten- und Halbwüstenböden, die Kalkanteile als natürliche Beimengung in erheblichen Größenordnungen aufweisen können. Dies könnte ein Hinweis auf die in Marokko über Jahrhunderte übliche Ausführung von Tadelakt auf Lehm sein. Schroeder, H., Lehm-Bau, 2010, Wiesbaden, S. 84
 - 26 Dreifach-Klima-Anlage „Küstenklima“, $-25^\circ\text{C}/+70^\circ\text{C}$
 - 27 Tadelakt-Meister

Ethnographic and geological investigations

Based on a field study in Morocco into the material composition of tadelakt, a map will be prepared of present-day and historic lime quarrying areas and lime samples analysed according to the factors already mentioned.

In addition, tadelakt surfaces of different ages will be examined from a stochastic-statistical aspect.

Furthermore the application technologies (presumably different from Maâlem²⁷ to Maâlem) will be examined and local plastering techniques described from a comparative angle.

Spatial awareness and health

It has been revealed that the Colour.Design.Therapy Institute and the Faculty of Lighting Design at the University of Wismar in a collaboration with the Department of Emotion Research at the Fraunhofer Institute IGD Rostock, propose to prepare numerically definable gradients of comfort perception with regard to the different surface feel and chromaticity of tadelakt compared with artificial building materials.

- 1 Cf. Schroeder, H., Volhard, F., Röhlen, U., Ziegert, C., Die Lehm- und Kalkputze 2012 – 10 Jahre Erfahrungen mit der praktischen Anwendung, p. 12, in: Tagungsbeiträge der 5. Internationalen Fachtagung für Lehm- und Kalkputze, Hrsg.: Dachverband Lehm e.V., Weimar, 2008.
- 2 Only 8 % of building waste produced today is recyclable – the rest ends up at the dumping site; Ratgeber Bauen und Wohnen, Dämmstoff-Recycling, ARD, Broadcast: 20.5.2012.
- 3 Steam baths also come into the sauna category. In a steam bath temperatures of between 55 and 70°C and a humidity of up to 95% are reached.
- 4 To describe tadelakt the firm Kreidezeit uses the terms water resistant and water repellent; Kreidezeit: Tadelakt product brochure, o.J., o.O. Fromme/Herz describe lime polished plaster as waterproof; Fromme, I., Herz, U., Lehm- und Kalkputze, 2012, Staufen bei Freiburg, p. 137. Ochs describes tadelakt as impermeable; Ochs, M.J., Tadelakt, 2007, Munich, p. 52. DIN 4108-3 distinguishes between water resistant and water repellent. Klopfer and others subdivide into even more water absorption classes: water impervious from $w_{50} \geq 0.001 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h} \cdot 0.5$. Diverging from that, Weber uses for the classification of hydrophobic plasters a very definite transition from water repellent to water impervious at $w < 0.1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h} \cdot 0.5$. Klopfer, H., and A., Lehrbuch der Bauphysik, 1997, Stuttgart, p. 354. Weber, H., Kompetenzzentrum Bautenschutz und Bausanierung, www.kbb-weber.de/files/Wasseraufnahme.pdf (8.7.2012) DIN EN 1062-3 on the other hand differentiates three water permeability rates: high, middle and low (Classes I-III)
- 5 In the long-term hydrophobic lime plasters like tadelakt as fully declared building materials should, in consultation with the DIBt, be included on the draft list of technical instructions or in the building regulations list.
- 6 According to DIN EN 13914-1 the first plaster coat should be softer than the plaster base and each successive coat ought not be firmer than the layer onto which it is applied. Since tadelakt, after completion of the working up process carbonates in time back to limestone, this rule cannot be observed. Regarding an appropriate plaster base for tadelakt, the literature is in stark disagreement. Whereas on the one hand there is a strict

warning of scaling due to insufficient bond between lime and earth due to the differing binding processes, Ochs confirms that earth is a good render base; Ochs, M.J., Tadelakt, 2007, Munich, pp. 14, 44, 107. Fromme/Herz, together with concrete, stone and lime-cement, also recommend earth for the lime polished plaster imported from Morocco – but with adequate pre-wetting and prior consolidation with water glass; Fromme, I., Herz, U., Lehm- und Kalkputze, 2012, Staufen bei Freiburg, p. 137

- 7 Du Vignon (1766), De Ramecourt (1768) and Cederhielm (1785) already gave practical advice on improving the quality, continuity and efficiency of the firing process. Cf. Foroutan, H., Historische Putze, diploma thesis, 1998, Vienna, p. 12
- 8 Foroutan goes into great detail regarding differing sands according to their source, quality and mineralogical aspects as well as the different types of lime. Foroutan, H., Historische Putze, diploma thesis, 1998, Vienna, pp. 24-54
- 9 Casa Natura, Christian Kern, Kreidezeit Naturfarben GmbH
- 10 Composition of Moroccan tadelakt according to Ochs: ca. 95% crushed limestone, 5% sand, earth and ash (which occurs during the firing on site); Ochs, M. J., Tadelakt, 2007, Munich, p. 28.
- 11 In collaboration with the Faculty of Civil Engineering at the University of Applied Sciences, Wismar, Prof. Malorny
- 12 Can Moroccan lime deposits be classified as a geologically unique material structure or are they simply the chance product of ethnological practices?
- 13 Tadelakt can withstand operational impact after 4 weeks according to the firm Kreidezeit – the hardening process is finally reached in ca. 6 months; www.kreidezeit.de/Produktinformationen/PDFs_Datenblaetter/Tadelakt.pdf. (10.7.2012) Ochs recommends a waiting time of one week for water-retaining vessels; for floors and stoves one month; Ochs, M.J., Tadelakt, 2007, Munich, p. 50 Höpfer quotes a carbonation front of 10mm per year. For tadelakt applied in 2 layers with a total thickness of 2.5-5 mm full carbonation would therefore take between 3 and 6 months; Höpfer, N., Kalkputzregeln, 2011, <http://romankalk.webs.com/links.htm> (23.6.2012)
- 14 Phenolphthalein reacts with alkaline substances (pH > ca. 10) by turning violet. It is used in alcoholic solutions to provide visual evidence of carbonation in concrete, by dampening a freshly broken and exposed surface with a spray bottle.
- 15 DIN EN 1015-12
- 16 DIN EN ISO 15148 and procedure according to Karsten
- 17 DIN EN ISO 12572, dry and wet cup experiments
- 18 The test series already in progress to establish the construction physical specific values for compacted and reinforced lime plaster will continue to be performed at the Wismar University in collaboration with KBauMV (Kompetenzzentrum Bau) until 2014.
- 19 DIN EN 1015-12
- 20 The guideline value for the adhesive strength of earth render mortars on concrete panels and within the plaster layers is in normal circumstances $\geq 0.05 \text{ N/mm}^2$, for secondary spaces $\geq 0.03 \text{ N/mm}^2$; Dachverband Lehm e.V., Anforderungen an Lehmputze, TM 01, 2008, Weimar, p. 5
- 21 According to Röhlen, U., Ziegert, C., Lehm- und Kalkputze, 2010, Berlin, p. 34
- 22 Cf. Volhard, F., Lehmausfachungen und Lehmputze, 2010, Stuttgart, p. 76
- 23 DIN EN ISO 15148
- 24 Volhard, F., Lehmausfachungen und Lehmputze, 2010, Stuttgart, p. 76
- 25 Schroeder mentions desert and semi-desert soils that exhibit a proportion of lime as a natural constituent in substantial amounts. This could be evidence that the application of tadelakt on earth has been common practice in Morocco for centuries. Schroeder, H., Lehm- und Kalkputze, 2010, Wiesbaden, p. 84
- 26 Three-fold climatic chamber “coastal climate”, -25°C/+70°C
- 27 Master tadelakt specialist