

Untersuchungen zur Haftscherfestigkeit von Lehmmauermörtel

Die Haftscherfestigkeit zwischen Mörtel und Mauerstein, auch Anfangsscherfestigkeit genannt, ist eine wichtige Kenngröße im Mauerwerksbau. Sie wird für die Ermittlung der zulässigen Zug- und Biegezugspannung parallel zur Lagerfuge sowie der zulässigen Schubspannungen bei Scheiben- und Plattenbeanspruchung herangezogen. Solche Beanspruchungen treten beispielsweise bei Außenwänden unter Windlast und bei aussteifenden Wänden auf. Die Haftscherfestigkeit des Mörtels verhindert in diesen Fällen, dass die Mauersteine „übereinander abgleiten“ bzw. voneinander abscheren. In den in Deutschland geltenden Bemessungsregeln für Mauerwerk (derzeit noch nach DIN 1053-100 [1] in Abhängigkeit von Mörtelart und Mörtelgruppe und nach DIN EN 1996-1-1 [2] in Abhängigkeit von Mauersteinart, Mörtelart und Mörtelfestigkeitsklasse) werden dazu charakteristische Werte der Haftscherfestigkeit zur Verfügung gestellt.

Mit Einführung einer durch den Dachverband Lehm e. V. initiierten Produktnorm werden zukünftig auch für Lehmmauermörtel Mindestwerte der Haftscherfestigkeit als Grundlage für die Bemessung von tragendem Lehmsteinmauerwerk festgelegt werden. Diese Produktnorm wurde innerhalb des Normenausschusses Bauwesen (NA Bau) durch den Arbeitsausschuss „Lehmbau“ erarbeitet und im August dieses Jahres als Normentwurf E DIN 18946 veröffentlicht [3]. Darin werden die Mindestwerte der Haftscherfestigkeit von Lehmmauermörtel in Abhängigkeit der Druckfestigkeit bzw. der Festigkeitsklasse angegeben (Tabelle 1).

Lehmmauermörtel der Festigkeitsklasse M0 ist nur für nichttragendes Mauerwerk zugelassen. Für tragendes Mauerwerk muss Lehmmauermörtel mindestens eine Druckfestigkeit von 2 N/mm² und mindestens eine Haftscherfestigkeit von 0,02 N/mm² aufweisen. Da systematische Untersuchungen über

die Haftscherfestigkeit von Lehm Mörteln nicht vorlagen beruhen die Angaben zu den Mindestwerten der Haftscherfestigkeit zunächst auf Erfahrungswerten aus der Praxis. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Haftscherfestigkeit auf der sicheren Seite liegend als ein Hundertstel der Druckfestigkeit angenommen werden kann. Im Laufe des Normungsprozesses wurden deshalb in der BAM Untersuchungen mit Lehmmauermörteln durchgeführt, um die Plausibilität dieser Mindestanforderungen an die Haftscherfestigkeit und die Durchführung der Haftscherfestigkeitsprüfung zu überprüfen. Ziel der Untersuchungen war außerdem, den Stand der Kenntnisse über materialbedingte Einflussgrößen zu erweitern. Die Ergebnisse der Untersuchungen haben Eingang in die E DIN 18946 [3] gefunden.

Untersuchungen

Für die Untersuchungen wurden fünf werkmäßig hergestellte Lehmmauermörtel herangezogen. Darunter befanden sich drei rein mineralische Mörtel und zwei Mörtel mit pflanzlichen Zusatzstoffen. Die Bezeichnungen und wesentlichen Merkmale der untersuchten Trockenmörtel können der Tabelle 2 entnommen werden.

Die Feuchte der Trockenmörtel hat einen Einfluss auf die für die vorgeschriebene Prüfmörtelkonsistenz erforderliche Menge an Zugabewasser. Sie wurde deshalb durch Trocknung der Trockenmörtel bis zur Massekonstanz bei 40 °C unter Vakuum ermittelt. Die Bestimmung der Sieblinie der Trockenmörtel erfolgte durch Trockensiebung nach DIN 18123 [4]. Die mineralischen Mörtel wurden vor der Siebung bei 40 °C unter Vakuum bis zur Massekonstanz getrocknet. Im Falle der Mörtel mit organischen Zusatzstoffen wurden diese vor der Siebung durch Schlämmen abgetrennt. Die mineralischen Bestandteile dieser Mörtel wurden vor der Siebung ebenfalls bei 40 °C unter Vakuum bis zur Massekonstanz getrocknet. Die Partikelgrößenverteilungen der Feinteile < 0,063 mm wurden mittels Laserbeugung (Trockendisersion) gemessen. An Teilen dieser Kornfraktion wurde auch der Mineralbestand mittels Röntgenphasenanalyse (XRD) bestimmt. Die Prüfmörtel wurden gemäß E DIN 18946 [3] auf ein Ausbreitmaß von (175 ± 5) mm eingestellt. Daraus wurden Mörtelprismen 40 mm × 40 mm × 160 mm für die Bestimmung der Rohdichte, der Druckfestigkeit und des linearen Trocknungsschwindmaßes hergestellt. Vor der Prüfung lagerten die Mörtelprismen bis zur Massekonstanz bei 23 °C und 50% relative Luftfeuchte. Die Prü-

Tabelle 1: Festigkeitsklassen von Lehmmauermörtel [3]

Festigkeitsklasse	Druckfestigkeit N/mm ²	Haftscherfestigkeit N/mm ²
M0	–	–
M2	≥ 2,0	≥ 0,02
M3	≥ 3,0	≥ 0,03
M4	≥ 4,0	≥ 0,04

Investigations into the adhesive shear strength of earth masonry mortar

The adhesive shear strength between mortar and brick, also known as initial shear strength, is an important parameter in brickwork construction. It is consulted for the calculation of the permitted tensile stress and flexural strength parallel to the bearing joint as well as the permitted shear stresses with slab and plate stress. Such stresses occur for example with external walls under wind load and with stiffening walls. In these cases the adhesive shear strength of the mortar prevents the bricks from “sliding between courses” or shearing from each other. In the dimensional rules for brickwork that apply in Germany characteristic values for adhesive shear strength are supplied (currently still according to DIN 1053-100 [1], irrespective of mortar type and group and according to DIN EN 1996-1-1 [2] irrespective of brick type, mortar type and mortar strength class).

With the introduction of a product standard initiated by the Dachverband Lehm e.V., minimum adhesive shear strength values for clay masonry mortar will in the future also be the basis for the calculation of structural earth brick masonry. This product standard was prepared within the Standards Committee for Building Construction (NA Bau) by the “Lehmbau” working committee and issued in August 2012 as Draft Standard E DIN 18946 [3]. It quotes the minimum adhesive shear strength values for clay masonry mortar relative to compressive strength or the strength class (Table 1).

Clay masonry mortar of strength class M0 is only permitted for non-structural brickwork. For structural brickwork the clay masonry mortar must have a minimum compressive strength of 2 N/mm² and a minimum adhesive shear strength of 0.02 N/mm². Since systematic investigations into the adhesive shear strength of clay mortars were not available, the data for

this were based on experience data derived from practice. Here, to be on the safe side, it was assumed that the adhesive shear strength could amount to one hundredth of the compressive strength. In the course of the standardisation process the investigations at the BAM were therefore conducted using clay masonry mortar, in order to assess not only the plausibility of these minimum values for adhesive shear strength and but also the method with which the adhesive shear strength test were performed. Another purpose of the investigations was to increase the current state of knowledge about material induced parameters. The results of the investigations have found their way into E DIN 18946 [3]

The investigations

Five factory-produced clay masonry mortars were used for the investigations. Of these three were purely mineral mortars and two mortars contained organic additives. The descriptions and main characteristics of the examined dry mortars can be found in Table 2.

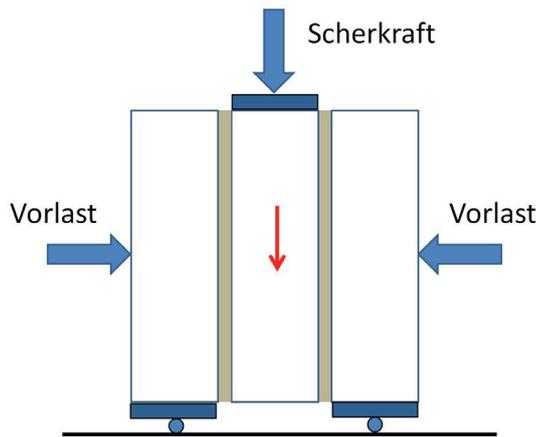
The moisture content of the dry mortars has an influence on the required amount of added water needed to achieve the specified test mortar consistency. It was therefore established by drying out the dry mortar to constant weight at 40 °C under vacuum.

The grain size of the dry mortar was determined by dry sieving in accordance with DIN 18123 [4]. The mineral mortars were dried before sieving at 40 °C under vacuum down to constant weight. In the cases of mortars containing organic additives, these were removed before sieving by elutriation. The mineral particles of these mortars were similarly dried before sieving at 40 °C under vacuum down to constant weight. The particle size distribution of the fines < 0,063 mm were measured by laser diffraction (dry dispersion). On some of the granules the mineral constituents were also determined the using X-ray phase analysis (XRD).

The test mortars were prepared in accordance with E DIN 18946 [3] to a slump flow of (175±5) mm. With these mortar prisms of 40 mm × 40 mm × 160 mm were produced to ascertain the raw density, the compressive strength and the linear drying shrinkage coefficient. Before the investigation the

Table 1: Strength classes of clay masonry mortar [3].

Strength class	Compressive strength N/mm ²	Adhesive shear strength N/mm ²
M0	–	–
M2	≥ 2.0	≥ 0.02
M3	≥ 3.0	≥ 0.03
M4	≥ 4.0	≥ 0.04



Bezeichnung	Zusammensetzung (Herstellerangaben)	Erscheinungsbild
LMM-m-1	Natur-Baulehm, Sand 0/2 mm	lose, erdfeucht
LMM-m-2	gebrochener Baulehm, Sand 0/2 mm	lose, erdfeucht
LMM-m-3	gemahlenes Lehm-pulver	lose, trocken
LMM-f-1	Natur-Baulehm, Sand 0/2 mm, Zusatzstoff: Holzhäcksel	lose, erdfeucht
LMM-f-2	gebrochener Baulehm, Sand 0/2 mm, Zusatzstoff: Stroh-häcksel	lose, erdfeucht

Tabelle 2: Untersuchte Lehm-mauermörtel

fung der Druckfestigkeit erfolgte nach DIN EN 1015-11 [5] an mittig gebrochenen Mörtelprismen. Das Schwindmaß ergab sich aus der Längenänderung der Mörtelprismen bezogen auf die Ausgangslänge (Forminnenmaß = 160 mm).

Die Prüfkörper für die Bestimmung der Haftscherfestigkeiten bestanden aus jeweils drei mit Prüfmörtel aufeinander gemauerten Kalksandsteinen KSV-12-2,0-NF. Vor dem Vermauern lagerten die Kalksandsteine bei 23 °C und 50% relative Luftfeuchte. Ihr Feuchtegehalt betrug vor dem Vermauern 4,7%. Mit zusätzlichen Prüfserien wurde zum einen der Einfluss der Steinart auf die Haftscherfestigkeit untersucht. Hierfür wurden anstatt der Kalksandsteine industriell hergestellte Lehmsteine (Festigkeitsklasse 2, NF) mit einem der mineralischen Lehm-mörtel (LMM-m-1) zu Prüfkörpern vermauert. Die Lehmsteine lagerten vor dem Vermauern bis zur Massekonstanz bei 23 °C und 50% relative Luftfeuchte. Zum anderen sollte der Einfluss einer Vor-nässung der Steine auf die Haftscherfestigkeit ermittelt werden. Hierzu wurden Kalksand- und Lehmsteine unmittelbar vor dem

Vermauern für 10 Sekunden 0,5 cm tief in Wasser getaucht. Für die Herstellung der Prüfkörper dieser Serien wurde ebenfalls der mineralische Lehm-mörtel LMM-m-1 verwendet. Alle Prüfkörper lagerten bis zur Prüfung mindestens 28 Tage bei 23 °C und 50% relative Luftfeuchte.

Die Prüfung der Haftscherfestigkeit erfolgte nach DIN EN 1052-3, Verfahren A [6]. Dabei wurde eine Vorlast senkrecht zur Mörtel-fuge aufgebracht und der innere Stein von den äußeren beiden Steinen abgesichert (Bild 1). Die Scherprüfungen erfolgten bei drei Vorlaststufen an jeweils drei Prüfkörpern. Als Vorlaststufen wurden 0,05 N/mm², 0,10 N/mm² und 0,20 N/mm² gewählt, die unterhalb der nach den Lehm-bauregeln [7] zulässigen Druckspannungen für tragende Wände aus Mauerwerk mit Lehmsteinen lagen.

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte durch grafische Darstellung der Einzelwerte der Scherfestigkeiten in Abhängigkeit von der jeweiligen Druckspannung infolge Vorbelastung

Tabelle 3: Eigenschaften und Zusammensetzung der Trockenmörtel

Mörtel-bezeichnung	Faser-gehalt	Feuchte-gehalt	Anteil Kornfraktion		Tonminerale (Schichtsilikate) ¹⁾
	M.-%	M.-%	< 0,063 mm	< 0,002 mm	
			M.-%	Vol.-%	
LMM-m-1	–	3,5	21,1	1,6	Kao, Mon, Chl,
LMM-m-2	–	3,3	14,4	1,6	Kao, Mon, Chl, Ill
LMM-m-3	–	2,0	7,4	0,4	Kao, Mon, Chl, Ill
LMM-f-1	1,8	19,6	50,4	2,8	Kao, Mon, Chl
LMM-f-2	1,8	6,0	10,5	1,0	Kao, Mon, Chl, Ill

¹⁾ Kao: Kaolinit, Mon: Montmorillonit, Chl: Chlorit, Ill: Illit.

1 Schematische Darstellung der Scherprüfung mit Vorlast nach DIN EN 1052-3 [6]
 1 Schematic diagram of the shear test with preloading acc. to DIN EN 1052-3 [6]

Description	Composition (acc. to manufacturer)	Appearance
LMM-m-1	Natural earth, Sand 0/2 mm	loose, earth moist
LMM-m-2	Crushed earth, Sand 0/2 mm	loose, earth moist
LMM-m-3	Powdered clay (ground)	loose, dry
LMM-f-1	Natural earth, Sand 0/2 mm, Additive: wood chippings	loose, earth moist
LMM-f-2	Crushed earth, Sand 0/2 mm, Additive: chopped straw	loose, earth moist

Table 2: Examined dry mortars

mortar prisms were stored until constant weight was achieved at 23 °C and 50% relative humidity. The compressive strength test was performed in accordance with DIN EN 1015-11 [5] on centrally cracked mortar prisms. The shrinkage coefficient was established by the length change of the mortar prism relative to its initial length (form internal dimension = 160 mm).

The test objects for determining the adhesive shear strength consisted in each case of three sand-lime bricks KSV-12-2.0-NF laid in courses with the test mortar for the joints. Before building up, the sand-lime bricks were stored at 23 °C and 50% relative humidity. Their moisture content before building up was 4.7%. In further test sequences, first the influence of the brick type on the adhesive shear strength was examined. For this, instead of using sand-lime bricks industrially produced earth bricks (strength class 2, NF) with a mineral clay mortar (LMM-m-1) were built up as test objects. The earth bricks were stored until constant weight was achieved at 23 °C and 50% relative humidity. Then the influence of pre-wetting the bricks on the

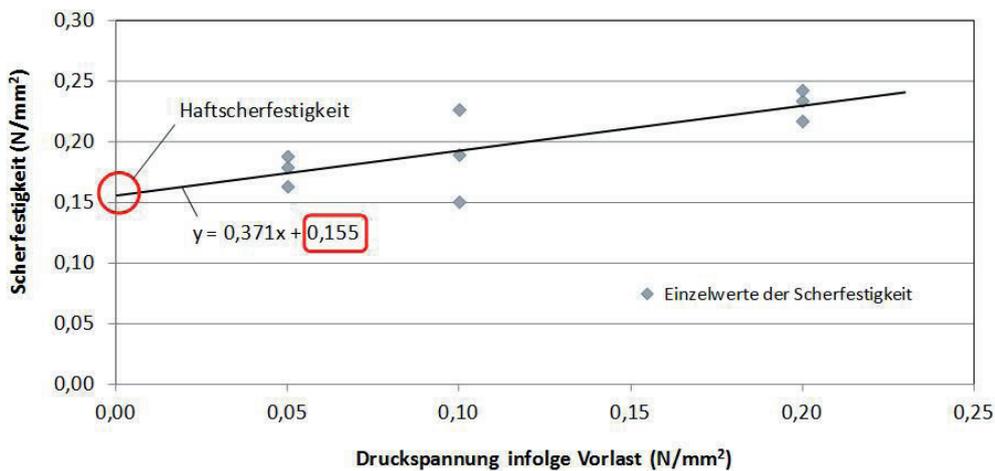
adhesive shear strength was examined. The sand-lime and earth bricks were each submerged immediately before building up for 10 seconds to a depth of 0.5 in water. For making the test objects of these sequences, the mineral LMM-m-1 clay mortar was once again used. All test objects were stored before testing for at least 28 days at 23 °C and 50% relative humidity.

The investigation of adhesive shear strength was performed in accordance with DIN EN 1052-3, procedure A [6]. For this a preload was imposed vertically onto the mortar joint until the middle brick sheared away from the two outer bricks (Fig. 1). The shear tests were carried out with three preload increments in each case on three test objects. For the preload, incremental steps of 0,05 N/mm², 0,10 N/mm² und 0,20 N/mm² were chosen, which lay below the permitted compression stresses for structural walls in brickwork with earth bricks, according to the Lehm bau Regeln [7].

Table 3: Properties and composition of the dry mortars

Mortar description	Fibre content <i>M</i> .-%	Moisture content <i>M</i> .-%	Proportion of grain fraction		Clay mineral (layered silicate) ¹⁾
			< 0.063 mm <i>M</i> .-%	< 0.002 mm <i>Vol</i> .-%	
LMM-m-1	–	3.5	21.1	1.6	Kao, Mon, Chl,
LMM-m-2	–	3.3	14.4	1.6	Kao, Mon, Chl, Ill
LMM-m-3	–	2.0	7.4	0.4	Kao, Mon, Chl, Ill
LMM-f-1	1.8	19.6	50.4	2.8	Kao, Mon, Chl
LMM-f-2	1.8	6.0	10.5	1.0	Kao, Mon, Chl, Ill

¹⁾ Kao: Kaolinit, Mon: Montmorillonit, Chl: Chlorit, Ill: Illit.



(Bild 2). Durch lineare Regression der Punkte wurde eine Gerade ermittelt. Die Haftscherfestigkeit des Mörtels bei einer Druckspannung infolge Vorlast von Null ergab sich dann aus dem Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der Ordinate. Aus dieser wurde die charakteristische Haftscherfestigkeit gemäß DIN EN 1052-3 [6] durch Abminderung der Haftscherfestigkeit um 20% berechnet.

Ergebnisse und Diskussion

Die Tabelle 3 gibt die Eigenschaften und Zusammensetzungen der Trockenmörtel wieder. Der Feuchtegehalt war bei den Mörteln mit pflanzlichen Zusatzstoffen deutlich höher als bei den rein mineralischen Mörteln. Den niedrigsten Feuchtegehalt wies der mineralische Mörtel LMM-m-3 auf, der „trocken“ angeliefert wurde (vergl. Tabelle 1). Den mit Abstand höchsten Anteil an Ton/Schluff (Kornfraktion < 0,063 mm) ergab die Siebanalyse bei dem Trockenmörtel LMM-f-1. Der niedrigste Anteil wurde beim Trockenmörtel LMM-m-3 festgestellt. Bezogen auf den Ton/Schluff-Anteil betrug der Anteil der Kornfraktion < 0,002 mm bei allen Trockenmörteln zwischen 5 und 11 %.

In allen Trockenmörteln wurden die Schichtsilikate Kaolinit, Montmorillonit und Chlorit festgestellt. In den Mörteln LMM-m-2, LMM-m-3 und LMM-f-2 befand sich überdies auch das Tonmineral Illit, das vergleichsweise wenig Wasser aufnimmt und nur gering quellfähig ist. Eine Quantifizierung der einzelnen Tonminerale im Feinanteil der Trockenmörtel war mit der Röntgenphasenanalyse nicht möglich.

Für das Einstellen der geforderten Prüfmörtelkonsistenz waren unterschiedlich hohe Mengen an Zugabewasser erforderlich.

In der Tabelle 4 werden sie durch das Massenverhältnis von Zugabewasser zu Trockenmörtel (w/L) beschrieben. Besonders niedrig war es beim Mörtel LMM-m-2. Sein Feuchtegehalt vor der Prüfmörtelherstellung war dem des Mörtels LMM-m-1 sehr ähnlich. Eine mögliche Ursache für den relativ niedrigen Wasseranspruch des LMM-m-2 könnte deshalb die Anwesenheit des Tonminerals Illit sein, das weniger Wasser aufnimmt als andere Tonminerale. Dadurch stünde mehr Wasser für die Verflüssigung des Mörtels zur Verfügung. Illit wurde auch in den Mörteln LMM-m-3 und LMM-f-2 nachgewiesen. Deren höherer Wasseranspruch kann aber durch den niedrigeren Feuchtegehalt des LMM-m-3 bzw. durch die Wasseraufnahme der Strohhäcksel im LMM-f-2 erklärt werden.

In der Tabelle 4 sind auch die Festmörtel Eigenschaften dargestellt. Die Rohdichten der drei rein mineralischen Mörtel waren annähernd gleich. Erwartungsgemäß waren sie bei den beiden Mörteln mit organischen Zusatzstoffen niedriger. Dementsprechend waren auch die Druckfestigkeiten der rein mineralischen Mörtel ähnlich. Offenbar wirkten sich die organischen Zusatzstoffe positiv auf die Festigkeiten aus, da die Mörtel LMM-f-1 und LMM-f-2 trotz der niedrigeren Rohdichten ein ähnliches Festigkeitsniveau erreichten wie die rein mineralischen Mörtel.

Die linearen Trocknungsschwindmaße war bei allen Mörteln relativ hoch, lag aber mit Ausnahme des Mörtels LMM-m-3 unterhalb der in der E DIN 18946 [3] empfohlenen Grenzwerte (2,5% bzw. 4,0% für faserbewehrte Lehmmauermörtel). Das hohe Schwindmaß des Mörtels LMM-m-3 kann auf die große Zugabewassermenge bzw. das hohe w/L-Verhältnis zurückgeführt werden, das für das Einstellen der Prüfmörtelkonsistenz erforder-

Tabelle 4: Frisch- und Festmörtel Eigenschaften der Prüfmörtel

Mörtelbezeichnung	Ausbreitmaß mm	w/L g/g	Rohdichte ¹⁾ kg/dm ³	Druckfestigkeit ²⁾ N/mm ²	Schwindmaß ¹⁾ %
LMM-m-1	177	0,17	1,88	2,93	2,3
LMM-m-2	174	0,07	1,89	3,11	2,2
LMM-m-3	177	0,20	1,81	2,54	3,1
LMM-f-1	174	0,14	1,43	2,65	2,3
LMM-f-2	177	0,18	1,65	2,37	2,8

¹⁾ Mittelwert aus 6 Einzelprüfungen, ²⁾ Mittelwert aus 12 Einzelprüfungen

2 Beispiel für Bestimmung der Haftscherfestigkeit nach DIN EN 1052-3, Verfahren A [6] (hier: Kalksandsteine vermauert mit Prüfmörtel LMM-m-2)
2 Example for determining the adhesive shear strength acc. to DIN EN 1052-3, procedure A [6] (sand-lime brick masonry with test mortar LMM-m-2)

The evaluation of the results was accomplished by graphically plotting the individual values of the shear strengths without taking into account the respective compression stresses resulting from preloading (Fig. 2). From the linear regression of the points a slope was established. The adhesive shear strength of the mortar under compression stress imposed by a zero preload was then indicated by the intersection of the regression slope and the ordinate. From this the characteristic adhesive shear strength was calculated in accordance with DIN EN 1052-3 [6], by reducing of the adhesive shear strength by 20%.

Results and discussion

Table 3 shows the characteristics and compositions of the dry mortars. The moisture content of the mortars with organic additives was distinctly higher than in the wholly mineral mortars. The LMM-m-3 mineral mortar, which was supplied “dry” (cf. Table 1), had the lowest moisture content. By far the highest proportion of clay/silt (grain fraction < 0,063 mm) was revealed by sieve analysis to be the LMM-f-1 dry mortar. The lowest proportion was found in the LMM-m-3 dry mortar. Regarding to the clay/silt content, the proportion of grain size < 0,002 mm was between 5 and 11%.

In all dry mortars the layered silicates kaolinite, montmorillonite and chlorite were identified. In the LMM-m-2, LMM-m-3 and LMM-f-2 clay mineral mortars illite was also found, which admits relatively little water and is only slightly swellable. Quantifying the individual clay minerals in the fines of the dry mortar was not possible by X-ray phase analysis.

Adjusting the consistency of the test mortar required differing amounts of added water. Table 4 indicates the mass proportions of added water to the dry mortar (w/L). The LMM-m-2 mortar required a particularly small amount. Its moisture content before the test was very similar to that of the LMM-m-1. A possible reason for the relatively low water requirement of the LMM-m-2 could therefore be the presence of the clay mineral illite, which takes up less water than other clay minerals. Thus more water would be available for the liquefaction of the mortar. Illite was also revealed in the LMM-m-3 and LMM-f-2 mortars. However, their higher water requirement could be explained by the lower moisture content of the LMM-m-3 and the water absorbed by the chopped straw in the LMM-f-2.

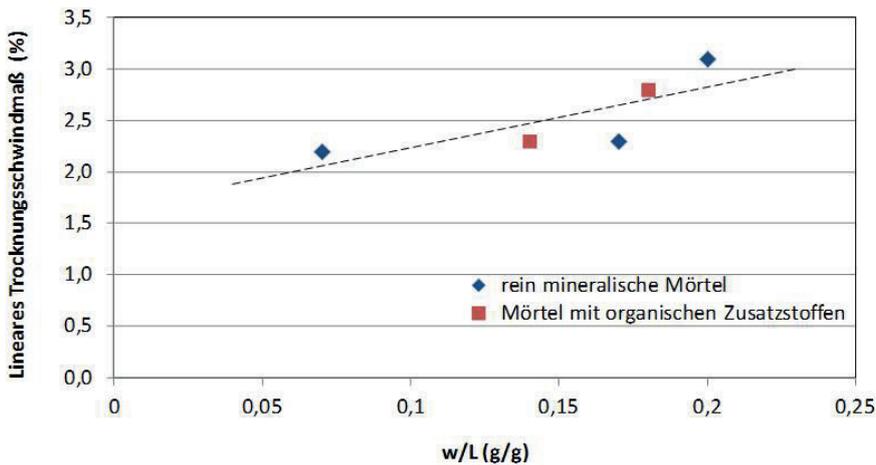
Table 4 also shows the cured mortar characteristics. The raw densities of the three wholly mineral mortars were more or less identical. As expected, these were lower with the two mortars with organic additives. Accordingly the compressive strengths of the wholly mineral mortars were similar. Evidently the organic additives had a positive effect on the strength, because the LMM-f-1 and LMM-f-2 mortars reached a similar strength level as the wholly mineral mortars in spite of their lower raw densities.

The linear drying shrinkage values were relatively high with all the mortars but, with the exception of the LMM-m-3, these were below the recommended critical values (2.5% or 4.0% for fibre-reinforced earth masonry mortars) in the E DIN 18946 [3]. The high shrinkage value of the LMM-m-3 can be attributed to the large amount of added water or the high w/L ratio that was needed to achieve the required consistency of the test mortar.

Table 4: Wet and dry properties of the tested mortars

Mortar description	Slump flow <i>mm</i>	w/L <i>g/g</i>	Bulk density ¹⁾ <i>kg/dm³</i>	Compressive str. ²⁾ <i>N/mm²</i>	Shrinkage value ¹⁾ <i>%</i>
LMM-m-1	177	0.17	1.88	2.93	2.3
LMM-m-2	174	0.07	1.89	3.11	2.2
LMM-m-3	177	0.20	1.81	2.54	3.1
LMM-f-1	174	0.14	1.43	2.65	2.3
LMM-f-2	177	0.18	1.65	2.37	2.8

¹⁾ Mean value of 6 individual tests, ²⁾ Mean value of 12 individual tests



lich war. So wurde tendenziell bei den untersuchten Prüfmörteln eine Abhängigkeit des linearen Trocknungsschwindmaßes vom w/L-Verhältnis beobachtet (Bild 3).

Die Ergebnisse der Scherversuche können der Tabelle 5 entnommen werden. Diese sind als charakteristische Haftscherfestigkeiten dargestellt. Die Tabelle 5 gibt auch die Klassifizierung der Lehmmauermörtel wieder. Die charakteristischen Haftscherfestigkeiten aller geprüften Lehmmauermörtel waren um ein Vielfaches größer als die in der E DIN 18946 [3] festgelegten Mindestwerte der Haftscherfestigkeit. Wie bei der Druckfestigkeit war auch bei den Haftscherfestigkeiten ein positiver Einfluss der organischen Zusatzstoffe zu beobachten, da die faserbewehrten Mörtel trotz der niedrigeren Rohdichteklasse ein ähnliches Festigkeitsniveau erreichten wie die rein mineralischen Mörtel. Die höchste Haftscherfestigkeit wurde mit dem Mörtel LMM-m-2 erzielt, der auch die höchste Druckfestigkeit aufwies.

Die zusätzlichen Scherversuche mit Lehmsteinen anstatt der Kalksandsteine ergaben deutlich höhere Haftscherfestigkeiten (Bild 4), wobei sich das Vornässen der Lehmsteine vor dem Vermauern günstig auswirkte. Allerdings wurde festgestellt, dass die Einzelwerte der Scherfestigkeiten bei Verwendung der Lehmsteine einer größeren Streuung unterlagen. Zudem versagten die Prüfkörper in einigen Fällen nicht durch Schub in der Mörtelfuge, sondern durch Zerbrechen der Lehmsteine. Die Prüfkörper aus vorgehästeten Kalksandsteinen zerbrachen ausnahmslos beim Einbau in die Prüfmaschine, so dass keine Scherversuche durchgeführt werden konnten. Der offensichtlich ungenügende Haftverbund zwischen Lehmörtel und Kalksandstein, ist

vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Poren im oberflächennahen Bereich des Steins durch die Vornässung vollständig gesättigt waren und dadurch das Bindemittel des Lehmörtels kaum in den Stein eindringen konnte.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die charakteristischen Haftscherfestigkeiten der im Rahmen der vorgestellten Studie untersuchten Lehmmauermörtel lagen um ein Vielfaches über den in der E DIN 18946 [3] angegebenen Mindestwerten. Die Festlegungen dieses Normentwurfs können deshalb als hinreichend angesehen werden. Ein Lehmmauermörtel der Festigkeitsklasse M4 war zwar nicht Gegenstand der Untersuchungen. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass auch Lehmmauermörtel dieser Festigkeitsklasse den Anforderungen genügen.

Die Verwendung von Kalksandsteinen für die Bestimmung der Haftscherfestigkeit von Lehmmauermörteln ist auf der sicheren Seite liegend eine sinnvolle Festlegung der E DIN 18946 [3], da dadurch die Streuung der Einzelwerte der Scherfestigkeit relativ niedrig ist und die höhere Festigkeit der Kalksandsteine ein Schubversagen in der Mörtelfuge sicherstellt. Dabei haben sich die gewählten Vorlaststufen für die Druckbeanspruchung senkrecht zur Mörtelfuge als geeignet erwiesen. Allerdings sollten die Kalksandsteine vor dem Mauern der Prüfkörper nicht vorgehästet werden, da der Haftverbund zwischen Lehmörtel und Stein dadurch stark beeinträchtigt werden kann.

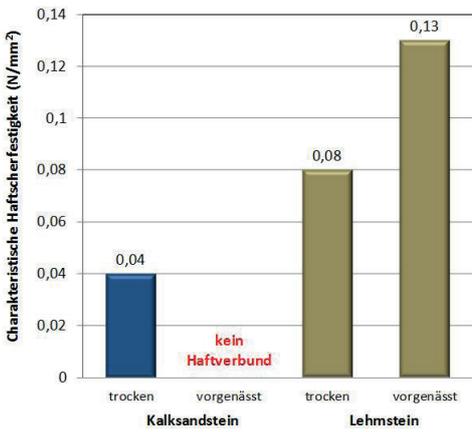
Die organischen Zusatzstoffe (Holz- und Strohhäcksel) der hier untersuchten Lehmmauermörtel hatten einen positiven Einfluss

Tabelle 5: Klassifizierung und Haftscherfestigkeiten der Mörtel

Mörtelbezeichnung	Rohdichteklasse ¹⁾	Festigkeitsklasse ¹⁾	Mindestwert der Haftscherfestigkeit ¹⁾ N/mm ²	Charakteristische Haftscherfestigkeit N/mm ²
LMM-m-1	2,0	M2	0,02	0,04
LMM-m-2	2,0	M3	0,03	0,12
LMM-m-3	2,0	M2	0,02	0,08
LMM-f-1	1,6	M2	0,02	0,10
LMM-f-2	1,8	M2	0,02	0,10

¹⁾ nach E DIN 18946 [3]

3 Lineares Trocknungsschwindmaß der Prüfmörtel in Abhängigkeit vom w/L-Verhältnis
3 Linear shrinkage value of the test mortar depending on the w/L ratio



Thus there was a tendency for the linear drying out shrinkage value of the tested mortars to be dependent on the w/L ratio (Fig. 3).

The results of the shear tests can be taken from Table 5. These are represented as characteristic adhesive shear strengths. Table 5 also shows the classification of the earth masonry mortars. The characteristic adhesive shear strengths of all the tested earth masonry mortars were many times greater than the minimum values for adhesive shear strengths stated in E DIN 18946 [3]. As with the compressive strength, a positive influence of the organic additives on the adhesive shear strengths could be observed, because the fibre-reinforced mortars achieved a similar strength level to that of the mineral mortars in spite of their lower raw density. The highest adhesive shear strength was reached by the LMM-m-2 mortar, which also had the highest compressive strength.

The additional shear tests conducted with earth bricks instead of sand-lime bricks displayed distinctly higher adhesive shear strengths (Fig. 4), although the pre-wetting of the earth bricks before building up had a positive effect. However, it was established that the individual values of the shear strengths when using earth bricks produced more scatter.

Furthermore the test objects failed in some cases not due to pressure imposed on the mortar joint but because the earth bricks fractured. The test objects comprising pre-wetted sand-lime bricks ruptured without exception while they were being prepared in the test machine, so that it was not possible to per-

form shear tests. The evidently insufficient bond between earth mortar and sand-lime brick was probably because the pores in the vicinity of the brick’s surface were completely saturated by the pre-wetting and as a result the bonding agent was unable to penetrate the brick.

Conclusions and outlook

The characteristic adhesive shear strengths of the earth masonry bricks that were the object of the study were many times higher than minimum values given in E DIN 18946 [3]. The pre-determined values of this draft standard can therefore be regarded as adequate. An earth masonry mortar of Strength Class M4 was not used in the investigation. It can however be assumed that earth masonry mortars of this strength class also satisfy these requirements

The use of sand-lime bricks to establish the adhesive shear strength of earth masonry mortars is a safe and sensible requirement of E DIN 18946 [3], because with these the scatter of the individual shear strength values is relatively low and the higher strength of the sand-lime bricks ensures a shear failure in the mortar joint. The chosen pre-load increments in the tests have proved appropriate for the pressure loading imposed vertically onto the mortar joint. Nevertheless, the sand-lime bricks should not be pre-wetted before building up the test object because the adhesive bond between earth mortar and brick can be seriously impaired by so doing.

The organic additives (wood and straw chips) of the earth masonry mortars examined here had a positive effect on the com-

Table 5: Classification and adhesive shear strength of the tested mortars

Mortar description	Bulk density class ¹⁾	Strength class ¹⁾	Minimum value for adhesive shear strength ¹⁾ N/mm ²	Characteristic adhesive shear strength N/mm ²
LMM-m-1	2.0	M2	0.02	0.04
LMM-m-2	2.0	M3	0.03	0.12
LMM-m-3	2.0	M2	0.02	0.08
LMM-f-1	1.6	M2	0.02	0.10
LMM-f-2	1.8	M2	0.02	0.10

¹⁾ according to E DIN 18946 [3]

- 4 Einfluss von Steinart und Vornässung auf die Haftscherfestigkeit (Mörtel LMM-m-1)
- 4 Influence of the kind of brick and pre-wetting on the adhesive shear strength (mortar LMM-m-1)

auf die Druck- und Haftscherfestigkeiten, da bei diesen Mörteln trotz der niedrigeren Rohdichten ein ähnliches Festigkeitsniveau erreicht wurde wie bei den rein mineralischen Mörteln.

Die linearen Trocknungsschwindmaße der Lehmmauermörtel entsprachen mit einer Ausnahme den Anforderungen der E DIN 18946 [3]. Bei diesem Mörtel kann das hohe Schwindmaß auf die hohe Menge an Zugabewasser zurückgeführt werden, die für das Einstellen der Prüfmörtelkonsistenz erforderlich war. Dennoch wurde auch in diesem Fall der Mindestwert der Haftscherfestigkeit weit übertroffen.

Für die breitere Anwendung von tragendem Lehmsteinmauerwerk ist die Anpassung der bisherigen Lehmbauregeln an den allgemein anerkannten Stand der Technik in Form von Bemessungsregeln auf der Grundlage des Teilsicherheitskonzepts erforderlich und erwünscht. Ein erster Schritt in diese Richtung ist nunmehr durch die Veröffentlichung der Produktnormen für Lehmsteine und Lehmmauermörtel getan. In einem weiteren Schritt gilt es, mit Bauteilversuchen Eingangsdaten für die Bemessung von Lehmmauerwerk zu bestimmen. In Anlehnung an die DIN EN 1996-1-1 [2] sollten hierfür auch Rechenwerte der Haftscherfestigkeit von Lehmmauermörtel zur Verfügung gestellt werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die tatsächlichen Haftscherfestigkeiten der Mörtel weit über den in der E DIN 18946 [3] festgelegten Mindestwerten liegen und dass sie bei Verwendung von Lehmsteinen anstatt von Kalksandsteinen noch höher ausfallen. Es sind deshalb weitergehende systematische Untersuchungen erforderlich, um hier eine breitere Datenbasis zu schaffen.

Referenzen

- [1] DIN 1053-100 (2007-09): Mauerwerk–Teil 100: Berechnung auf der Grundlage des semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts.
- [2] DIN EN 1996-1-1 (2010-12): Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten–Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk; Deutsche Fassung EN 1996-1-1:2005 + AC:2009.
- [3] E DIN 18946 (2012-08): Lehmmauermörtel–Begriffe, Anforderungen, Prüfverfahren.
- [4] DIN 18123 (2011-04): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben–Bestimmung der Korngrößenverteilung.
- [5] DIN EN 1015-11 (2007-05): Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel.
- [6] DIN EN 1052-3 (2007-06): Prüfverfahren für Mauerwerk – Teil 3: Bestimmung der Anfangsscherfestigkeit (Haftscherfestigkeit).
- [7] Dachverband Lehm e.V. (Hrsg.): Lehm bau Regeln–Begriffe, Baustoffe, Bauteile. 3., überarbeitete Auflage, Vieweg-Teubner, Wiesbaden 2009.

pression and adhesive shear strengths, since these mortars reached a strength level similar to the purely mineral mortars in spite of their low raw densities.

The linear drying out shrinkage values of earth masonry mortars conformed, with one exception, to the requirements of E DIN 18946 [3]. With these mortars the shrinkage value can be attributed to the high amount of added water, which was necessary to obtain the required test mortar consistency. Nevertheless, also in this case the minimum value for adhesive shear strength was exceeded by a large margin.

For the widespread use of structural earth brick masonry the hitherto applicable Lehm bau Regeln need to be revised in line with the generally acknowledged technological status quo in the form of dimensional rules defined on the basis of a partial safety factor concept. A first step in this direction has now been taken by the publication of product standards for earth bricks and earth masonry mortars. A further step would be with building component tests to stipulate the input data for performing the measurements. On the basis of DIN EN 1996-1-1 [2] calculated values for adhesive shear strength of earth masonry mortars should also be made available for this. The investigations have shown that the actual adhesive shear strengths of the mortars are way above the minimum values defined in E DIN 18946 [3] and that when using earth bricks instead of sand-lime bricks they turn out to be even higher. Ongoing systematic investigations are therefore needed, in order to create a more comprehensive database for this.

References

- [1] DIN 1053-100 (2007-09): Mauerwerk–Teil 100: Berechnung auf der Grundlage des semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts.
- [2] DIN EN 1996-1-1 (2010-12): Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten–Part 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk; Deutsche Fassung EN 1996-1-1:2005 + AC:2009.
- [3] E DIN 18946 (2012-08): Lehm mauer mör tel–Begriffe, Anforderungen, Prüfverfahren.
- [4] DIN 18123 (2011-04): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben–Bestimmung der Korngrößenverteilung.
- [5] DIN EN 1015-11 (2007-05): Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Part 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel.
- [6] DIN EN 1052-3 (2007-06): Prüfverfahren für Mauerwerk – Part 3: Bestimmung der Anfangsscherfestigkeit (Haftscherfestigkeit).
- [7] Dachverband Lehm e. V. (Publisher): Lehm bau Regeln–Begriffe, Bauteile, Bauteile. 3rd revised edition, Vieweg-Teubner, Wiesbaden 2009.