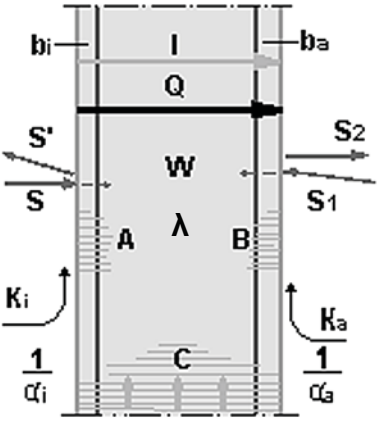
3.2. Bauphysikalische Messwertgeber

3.2.1 Grundlagen der Wärmeflussmessung

Der Wärmedurchgang eines Bauteils ist durch komplexe Zusammenhänge gekennzeichnet und hängt u.a. von den Wärmeleitfähigkeiten der verwendeten Materialien , ihren Schichtdicken , von der Bauteilgeometrie (ebene Wand, zylindrisch gekrümmte Rohrwandung, etc.) sowie den Übergangsbedingungen an den Bauteiloberflächen ab.

Einflussfaktoren auf den Wärmestrom einer Wand:



Q = Wärmestrom durch die Wand
I = Wasserdampf Diffusionsstrom
λ = Wärmeleitfähigkeit
1/α = Wärmeübergangswiderstand (innen und aussen)
b = Wärmeeindringkoeffizient (1-2 cm, innen und aussen)
S = Wärmestrahlung zur und von der Wand (1-2 mm)
A = Kondenswasser von innen
B = Feuchtigkeit von außen (z.B. Regen)
C = Feuchtigkeit im Mauerwerk (Kapillarität und Diffusion)
W = Wärmespeicherwert
K = Konvektion (innen und aussen)

3.2.2 Wärmedurchgangskoeffizient (U) - Physikalische Einheiten und Zusammenhänge

Der Wärmedurchgangskoeffizient (***U***) [U-Wert, früher k-Wert] beschreibt die Wärmemenge durch eine ein- oder mehrlagige Materialschicht, welche in einer Sekunde durch eine Fläche von 1 m² fließt, wenn sich die beidseitig anliegenden Lufttemperaturen stationär um 1 K unterscheiden.
Gegenüber dem Wärmedurchlaßkoeffizienten (***Λ***) werden beim U-Wert die Übergangskoeffizienten (α_i ; α_a), sprich die Intensitäten des Wärmeübergangs an den Grenzflächen innen und außen mit berücksichtigt .
Der Wärmedurchgangskoeffizient (***U***) ist der Reziprokwert des Wärmedurchgangswiderstandes (R_K), welcher sich aus der Summe der Wärmedurchlasswiderstände (***R***) der einzelnen hintereinander liegenden Bauteilschichten sowie der Wärmeübergangswiderstände (R_i ; R_a) zu den umgebenden Schichten (Luft etc.) an den beiden Oberflächen zusammensetzt:

$$U = \frac{1}{R_K} = \frac{1}{(R_i + R + R_a)} = \frac{1}{(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{\alpha_a})}$$

U = Wärmedurchgangskoeffizient in [W/m²K]
Rk = gesamter Wärmedurchgangswiderstand in [m²K/W]
Ri = Wärmeübergangswiderstand auf der Innenseite des Bauteils in [m²K/W]
Ra = Wärmeübergangswiderstand auf der Außenseite des Bauteils in [m²K/W]
R = Wärmedurchlasswiderstand in [m²K/W] (der einzelnen Schichten)
αi = Wärmeübergangskoeffizient innen in [W/m²K]
αa = Wärmeübergangskoeffizient außen in [W/m²K]
Λ = Wärmedurchlasskoeffizient [W/m²K]

Wärmedurchgangswiderstand	=	Wärmedurchlasswiderstände der einzelnen Schichten + Wärmeübergangswiderstände	$R_k = R + Ri + Ra$
Wärmedurchlasswiderstand	=	1 / Wärmedurchlasskoeffizient	$R = 1 / \Lambda$
Wärmeübergangswiderstand	=	1 / Wärmeübergangskoeffizient	$R_i = 1 / \alpha_i$, $R_a = 1 / \alpha_a$
Wärmedurchgangswiderstand	=	1 / Wärmedurchgangskoeffizient	$R_k = 1 / U$

3.2.3 Wärmestromdichte (q)
- Physikalische Einheiten und Zusammenhänge

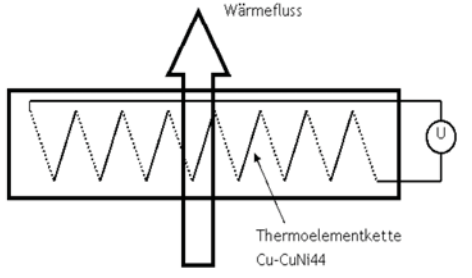
Durch ein Aussenbauteil, an dessen einer Seite Innenluft mit der Temperatur (T_{Li}) und an dessen anderer Seite Aussenluft mit der Temperatur (T_{La}) angrenzt, fliesst im **Gleichgewichtszustand** ein Wärmestrom mit der Dichte q. Die Wärmestromdichte errechnet sich nach folgender Formel:

$$q = U(T_{Li} - T_{La})$$

U = Wärmedurchgangskoeffizient in [W/m²K]
q = Wärmestromdichte in [W/m²]
T_{Li}, T_{La} = Temperatur Luft innen, Temperatur Luft aussen in [°C]

3.2.4 Messprinzip Wärmeflussplatten (Hilfswand bei U-Wert-Messung)

Wärmeflussplatten sind empfindliche Sensoren, die eine präzise Messung von Wärmestromdichten (***q***) [**Energie pro Zeit und Fläche**] ermöglichen.
Wird die Wärmeflussplatte auf die zu prüfende Messstelle gelegt, stellt sie einen dem Wärmefluss in den Weg gestellten Wärmewiderstand dar. Über die Dicke der Platte bildet sich beim Durchgang des Wärmeflusses ein Temperaturgefälle, das der Dichte des Wärmeflusses proportional ist.



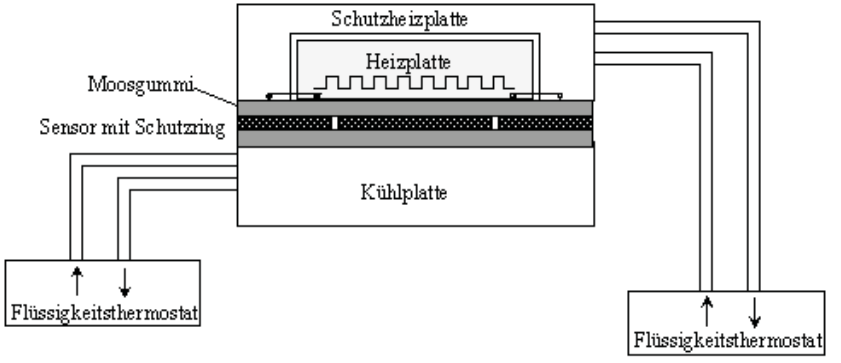
Wärmeflussplatten bestehen aus einem Mäander vieler gegeneinandergeschalteter Thermoelemente, die in einem Trägermaterial eingebettet sind.
Bei dickem Trägermaterial sind die

Platten so aufgebaut, dass sich neben dem Mäander eine ausreichende Randzone (Schutzring) befindet, die ein seitliches Umlaufen des Wärmeflusses verhindert. Die Wärmeflüsse beziehen sich stets auf die vom Mäander abgedeckte Oberfläche und bilden deren Mittelwert.
Diese aktiven Sensoren liefern leicht auszuwertende Signale im Millivoltbereich.
Die gesuchte Wärmestromdichte (***q***) ergibt sich durch Multiplikation der gemessenen
Gleichspannung (U_{th}) mit einer individuell bestimmten Kalibrierkonstanten (***C***) , meist ermittelt über eine Einplattenapparatur nach der Beziehung:

$$q = C\,U_{th}$$

q = Wärmestromdichte in [W/m²]
C = Kalibrierkonstante in [W/m²mV]
U_{th} = Messspannung in [mV]

Kalibrierung
Die Kalibrierung erfolgt bei einer Mittentemperatur von 25°C und einer Wärmestromdichte von ca. 100 W/m^2. Dabei ist der Sensor zwischen zwei Moosgummiplatten eingebettet.
Schematischer Aufbau der Plattenapparatur



Auf Kundenwunsch ist es möglich, die Kalibrierung auch bei anderen Mitteltemperaturen im Bereich von 10°C bis 50°C vorzunehmen.Die Reproduzierbarkeit der durchgeführten Kalibrierung ist besser als 1%. Für die Unsicherheit des Kalibrierwertes der Sensoren ist ein Wert von 5% für die Dauer eines Jahres garantiert.

Da die Kalibrierwerte durch Alterung, thermische Belastung und durch Eindiffundieren von Schadgasen und Wasser beeinflusst werden können, ist es empfehlenswert, die Sensoren in regelmäßigen Abständen (ca. 1 Jahr) nachkalibrieren zu lassen.

Das Ergebnis der Kalibrierung wird in einem Prüfbericht dokumentiert und gehört zum Lieferumfang jeder Wärmeflussplatte.

3.2.4.1 Ausführung

ALMEMO® Wärmeflussplatten
Der Kalibrierwert bei ALMEMO® Wärmeflussplatten FQ A0xx wird werksseitig bereits im ALMEMO® Stecker hinterlegt, so dass bei ALMEMO® Geräten sofort die aktuelle Wärmestromdichte in W/m^2 angezeigt wird (siehe Abb.)
Die Skalierung für den Kalibrierwert kann aber auch gemäß folgender Tabelle selbst vorgenommen werden:

max. Messbereich Wärmeflussdichte [W/m^2]	Kalibrierwert [W/m^2mV]	Messbereich	Faktor	Exp.
0.0 bis 5200.0	1.0...20.0	260 mV	0.100-2.000	1
0.0 bis 5200.0	10.0...200.0	26 mV	0.100-2.000	2

3.2.4.2 Einsatz Wärmeflussplatten

In vielen Bereichen von Naturwissenschaft und Technik werden Wärmefussplatten eingesetzt:
1. Bestimmung der Wärmeverluste durch Wände von Gebäuden, Rohrleitungen,Kühlhäuser, Wärmespeicher
2. Kalorimetrie und Messung thermischer Stoffkennwerte
3. technische Anwendungen, bei denen eine Temperaturdifferenz als Regelgrössedient

3.2.5 Messprinzip Ermittlung von Wärmekoeffizienten (U- Wert)

Das Meßprinzip zur quantitativen Erfassung von Wärmedurchgangsverlusten an Trennwänden, wie z.B. an Hauswänden, Erwärmungsanlagen usw., basiert auf der sogenannten Hilfswandmethode, bei welcher ein Messfühler (Wärmestromplatte) direkt in den Wärmeübergang eingebracht wird. Anhand der bekannten thermischen Eigenschaften des Fühlers und der thermoelektrisch gemessenen Temperaturdifferenz wird die Dichte (q) des Verlustwärmestroms bestimmt.
Werden zusätzlich beidseitig die Oberflächentemperaturen sowie die Lufttemperaturen im Übergangsbereich eines Bauteiles erfasst, können daraus alle relevanten Wärmekoeffizienten berechnet werden.
Praktisch stösst die Anwendung der genannten Formeln auf Schwierigkeiten, da diese nur im Gleichgewichtszustand gültig sind (d.h. zeitlich konstante Temperaturverhältnisse, die Wand gibt genauso viel Wärme ab, wie sie aufnimmt, die Wärmespeicherfähigkeit der Wand spielt dabei keine Rolle)!
Weiterhin müssen die Temperaturen exakt definiert werden!
Deshalb basiert die Berechnung auf der zyklischen Erfassung der Temperaturmittelwerte und der Mittelwerte der Wärmestromdichte.
Bei genügend langer Messzeit wird der Einflussder Wärmekapazität des Bauteiles auf die Berechnung, z.B. des U-Wertes, vernachlässigbar klein und der Mittelwert erreicht den tatsächlichen U-Wert, z.B. der Wand.
Je nach Anbringung der Temperaturfühler entspricht der Quotient q/T1-T0 dem Wärmeübergangskoeffizienten (**α_i** ; **α_a**), dem Wärmedurchlasskoeffizienten (***Λ***) oder dem Wärmedurchgangskoeffizienten (***U***) bzw. ihren Reziprokwerten (siehe Tabelle 3.2.2):

$$\text{Wärmeübergangskoeffizient } \alpha_i = \frac{\text{Wärmestromdichte q}}{(\text{Wandinnentemperatur } T_{Wi} - \text{Luftinnentemperatur } T_{Li})}$$

$$\text{Wärmeübergangskoeffizient } \alpha_a = \frac{\text{Wärmestromdichte q}}{(\text{Wandaussentemperatur } T_{Wa} - \text{Luftaussentemperatur } T_{La})}$$

$$\text{Wärmedurchlasskoeffizient } \Lambda = \frac{\text{Wärmestromdichte q}}{(\text{Wandinnentemperatur } T_{Wi} - \text{Wandaussentemperatur } T_{Wa})}$$

Experimenteller U-Wert:

$$\text{Wärmedurchgangskoeffizient } U = \frac{\text{Wärmestromdichte q}}{(\text{Luftinnentemperatur } T_{Li} - \text{Luftaussentemperatur } T_{La})}$$

Beispiel 1:
*Es besteht die Möglichkeit, den für die Wärmedämmeigenschaften einer Wand entscheidenden Wärmedurchlasswiderstand (**R**) aus Messungen der inneren und äusseren Oberflächentemperaturen sowie der Wärmestromdichte (**q**) zu bestimmen:*

$$q = \frac{1}{R}(T_{Wi} - T_{Wa})$$

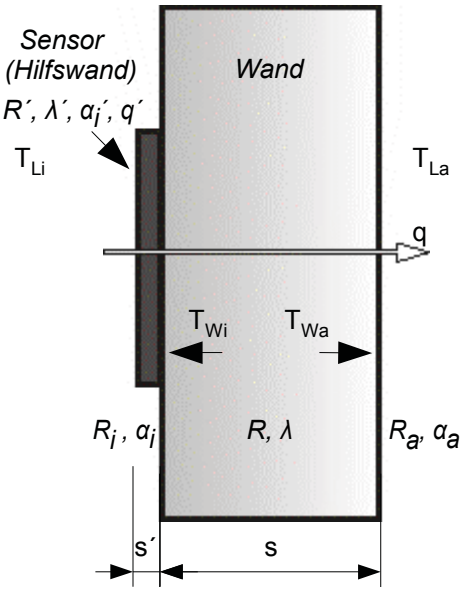
Beispiel 2:
*Bei bekanntem bzw. gemessenem U-Wert kann der Wärmedurchlasswiderstand (**R**) aus dem U-Wert berechnet werden:*

$$R = \frac{1}{U} - \frac{1}{\alpha_i} - \frac{1}{\alpha_a}$$

Für diesen Fall müssen die Wärmeübergangskoeffizienten (α_i ; α_a) bekannt sein, oder man verwendet die Werte aus der DIN :

$$\alpha_i = 7{,}69\ [W/m^2K] \ ; \ \alpha_a = 25\ [W/m^2K]$$

Wand mit aufgesetzter Wärmeflussplatte (Hilfswand):



T_{Li} = *Luftinnentemperatur in [°C]*
T_{La} = *Luftaussentemperatur in [°C]*
T_{Wi} = *Wandinnentemperatur Oberfläche in [°C]*
T_{Wa} = *Wandaussentemperatur Oberfläche in [°C]*
q = *Wärmestromdichte in [W/m²]*
R = *Wärmedurchlasswiderstand der Wandschicht(en) in [m²K/W]*
R_i = *Wärmeübergangswiderstand auf der Innenseite des Bauteils in [m²K/W]*
R_a = *Wärmeübergangswiderstand auf der Außenseite des Bauteils in [m²K/W]*
α_i = *Wärmeübergangskoeffizient innen in [W/m²K]*
α_a = *Wärmeübergangskoeffizient außen in [W/m²K]*
λ = *Wärmeleitfähigkeit der Wandschicht(en) in [W/m K]*
s = *Dicke der Wandschicht(en) in [m]*
R' = *Wärmedurchlasswiderstand der Wärmeflussplatte in [m²K/W]*

q´ = Wärmestromdichte der Wärmeflussplatte in [W/m²]
λ´ = Wärmeleitfähigkeit der Wärmeflussplatte in [W/m K]
α_i´ = Wärmeübergangskoeffizient der Wärmeflussplatte innen in [W/m²K]
s´ = Dicke der Wärmeflussplatte in [m]

3.2.6 Einsatz des Messverfahrens zur U-Wert-Bestimmung

Eine wichtige Kenngröße ist der Wärmedurchgangskoeffizient (***U***) im Bauwesen, wo er zur Bestimmung der Transmissionswärmeverluste durch Bauteile hindurch dient.
Mit dem Transmissionswärmeverlust wird die energetische Qualität der thermischen Hülle (Isolierung von Dach, Aussenwänden, Fenstern und Boden) eines Gebäudes beschrieben. Für jedes Wohngebäude ist in Abhängigkeit von der Umfassungsfläche und seinem Volumen ein zulässiger Höchstwert nach der Energieeinsparverordnung (EnEV) in der jeweils aktuellen Fassung vorgegeben.

Aufgrund der Phasenverschiebung zwischen gemessener Wärmestromdichte und den Temperaturdifferenzen sollte die Messung nur unter folgenden Bedingungen durchgeführt werden:

1. Die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Aussenluft muss ausreichend groß sein (Richtwert bei normaler Dämmung ΔT: > 10K, Richtwert bei grosser Dämmung ΔT: > 20K)
2. Die Schwankungen dieser Temperaturen (u.a.Tag/Nacht) sollten während der Messdauer möglichst klein sein.
3. Die Messwerte müssen vor Ort über einen ausreichend langen Zeitraum (ca. 2 bis mehrere Tage) aufgenommen und anschliessend über Mittelwerte berechnet werden.
4. Messung nur bei ausgeglichener Gebäudeinnentemperatur (Richtwert ca. 20°C)
5. Möglichst geringer Einfluss der in 3.2.1 aufgeführten Abhängigkeiten wie direkte Sonneneinstrahlung und Feuchtigkeit (z.B. Messung nachts, Messung bei trockener Witterung und an trockenen Flächen)

3.2.7 Normung

Die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten wird international im Standard ISO 6946 definiert.
Eine genormte Messvorschrift zur Bestimmung des U-Wertes existiert nicht. Die praktische Messung erfolgt auf Grundlage der Berechnungsformeln der DIN 4108, Wärmeschutz im Hochbau. Das in 3.2.5 beschriebene Messprinzip erfolgt also in Anlehnung an die DIN 4108, aber nicht **gemäss** DIN 4108.

3.2.8 Ausführung der Wärmekoeffizientenmessung mit ALMEMO® Messtechnik

Für den Praktiker:

Ein hoher Wärmedämmwert wird durch einen hohen Wärmedurchlaßwiderstand und geringe Wärmeleitfähigkeit erreicht.

Je höher der Wärmedurchgangskoeffizient, desto grösser sind die Wärmeverluste, die durch die Wand auftreten.

Je höher der Wärmedurchgangswiderstand, desto besser ist die Wärmedämmeigenschaft.

3.2.8.1 Anordnung und Programmierung der Fühler sowie Berechnung im ALMEMO® Gerät

In den ALMEMO® Geräten 2690-8 und 2890-9 steht ein Assistent-Menü zur Verfügung, mit dessen Hilfe je nach Betrachtung der Temperaturfühler ein Wärmekoeffizient
(siehe 3.2.5) aus einer Langzeitmessreihe berechnet wird. (Geräteanleitungen, Stichwort ´Wärmekoeffizient´).
Werden neben der Wärmestromdichte die Luftinnen- und Luftaussentemperaturen erfasst, handelt es sich beim im Gerät berechneten Wärmekoeffizienten um den U-Wert.
Beispiel ALMEMO® 2890-9:
Zur Bestimmung des Wärmekoeffizienten $\overline{q}/(T1-T0)$ werden die beiden Temperaturfühler der Aufgabenstellung entsprechend auf Kanal M0 und M1, sowie die Wärmeflussplatte auf M2 angesteckt. Die Temperaturdifferenz T(M1)-T(M0) wird automatisch auf Kanal M5 erfasst. Zur Messung müssen nur folgende Programmierungen durchgeführt werden:

Mittelmodus von M9:	CONT
Mittelmodus von M2:	CONT
Bereich von M12:	q/dt
Zyklus eingeben mit:	Zyklus-Timer
Messung starten mit:	<START>
Messung stoppen mit:	<STOP>

Assistent-Menü Wärmekoeffizient:

3.2.8.2 Anordnung und Programmierung der Fühler im ALMEMO® Gerät sowie Berechnung mit der AMR-WIN-CONTROL

Zur Berechnung der mit einem ALMEMO® Gerät aufgezeichneten Messwerte steht in der AMR-WIN-CONTROL ein U-Wert-Assistent zur Verfügung (siehe Katalog 06.10 und 14.03), welcher menügeführt die Berechnung und grafische Darstellung des U-Wertes übernimmt.
Bei dieser Methode muss den Messfühlern kein Mittelmodus zugewiesen werden, da die Mittelung und Berechnung über die Software erfolgt.
Auch die Kanalanordnung der Messfühler für Wärmestromdichte und Luftinnen- sowie Luftaussentemperatur auf dem ALMEMO® Gerät kann beliebig gewählt werden.
Die richtige Zuordnung der Sensoren wird ebenfalls im U-Wert-Assistent abgefragt.
Zur Messung und Erfassung eignen sich **alle** ALMEMO® Geräte ***V5 , V6 ALMEMO 2590, 2690, 2890, 8590, 8690, 5690*** mit internem oder externem Speicher.
Darüber hinaus kann der U-Wert-Assistent auch genutzt werden, um je nach Zuordnung der Temperaturfühler (Luft- oder Oberflächentemperatur) einen anderen Wärmekoeffizienten (Definition siehe 3.2.5) zu berechnen, muss jedoch berücksichtigen, dass es sich dann nicht mehr um den U-Wert handelt.

3.2.8.3 Messaufbau vor Ort für U-Wert Messung

Die **Wärmeflussplatte** wird vorzugsweise an der Innenwand angebracht. Die Unterseite sollte möglichst homogen mit der Messstelle verbunden sein ; z. B. durch:

- Aufkleben mit doppelseitigem PVC- oder Gewebeband.
- Verwenden Sie keine Papierfolie, da die Wärmeflussplatte später evtl. nur schwer abgelöst werden kann.
- Bestreichen der Unterseite mit Wärmeleitpaste und Fixierung mit Klebeband oder mechanischen Halteelementen am Plattenrand.
- Heizkörpernähe und Fensternischen möglichst meiden.

Als **Temperaturfühler** eignen sich blanke, an der Spitze verschweißte Thermodrahtfühler vom Typ FT 390-0 unterschiedlicher Länge.

Für die Messung der **Lufttemperatur innen** (***T_{Li}***) sollte die Messspitze mindestens in einem Abstand von 10 cm über der Wärmeflussplatte angeordnet werden und ca. 10 cm in den Raum hineinragen (abwinkeln).
Für die Messung der **Lufttemperatur aussen** (***T_{La}***) wird die Messspitze durch eine geeignete Mauer- oder Fensterdurchführung ebenfalls ca.10 cm von der Aussenwand fixiert.

3.2.8.4 Messaufbau vor Ort für zusätzliche Wärmekoeffizienten Messung

Sollen weitere Wärmekoeffizienten ermittelt werden (siehe 3.2.5), müssen auch die **Wandoberflächentemperaturen innen und aussen** gemessen werden.

Als **Temperaturfühler** eignen sich ebenfalls blanke, an der Spitze verschweißte Thermodrahtfühler vom Typ FT 390-0 unterschiedlicher Länge.

Für die Messung der **Wandoberflächentemperatur innen** (***T_{Wi}***) wird die Messspitze
mit geeignetem Klebeband direkt neben der Wärmeflussplatte befestigt.
Für die Messung der **Wandoberflächentemperatur aussen** (***T_{Wa}***) wird die Messspitze
durch eine geeignete Mauer- oder Fensterdurchführung mit geeignetem Klebeband auf der äusseren Wandoberfläche fixiert.

Zur Minimierung störender Einflüsse können die Temperaturfühler aussen durch ein vorgelagertes Ableitblech geschützt werden (Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung bzw. Feuchtigkeit)

Eine Zusammenstellung für die Messsysteme finden Sie im Ahlborn-Katalog 2009, Seite 14.03.

PEWA GROUP
K&S Elektronik MB-electronic

PEWA
Messtechnik GmbH

Weidenweg 21
58239 Schwerte

Tel.: 02304-96109-0
Fax: 02304-96109-88
E-Mail: info@pewa.de
Homepage : www.pewa .de