

gSKIN[®] Anwendungsbeschreibung: U-Wert Messung Fallstudie

35% des globalen Energieverbrauchs wird im Durchschnitt von Gebäuden verursacht. In Europa werden jährlich 3'100 TWh (oder 266 Mtoe) im Gebäudebetrieb verbraucht. Ein Grossteil des heutigen Gebäudebestandes wurde vor 1980 und mit tiefen Isolationsstandards gebaut. Diese tiefen Isolationsstandards führen zu grossen Mengen verschwendeter Energie und verursachen den Gebäudebetreibern erhebliche finanzielle Kosten. Durch energetische Sanierungen von betroffenen Gebäuden können diese Kosten verringert werden. Da das Einsparpotenzial hoch und die technische Umsetzung möglich ist, wächst das Marktfeld rund um energetische Sanierungen kontinuierlich und verschiedene attraktive Lösungen sind erhältlich. Allerdings arbeitet dieser Markt bis heute noch ohne quantitativ-messbare Isolationsdaten (bzw. U-Werten) von kompletten Gebäuden und Gebäudeelementen. In der Regel existieren lediglich Daten zu einzelnen Gebäudematerialien, die in Labors vom Hersteller unter perfekten Bedingungen gemessen wurden. Wo diese Werte nicht vorhanden sind, werden U-Werte von Gebäudeelemente meist durch äusserliche Begutachtung und anschliessende Schätzung basierend auf dem Baujahr von Energiefachleuten festgelegt. Das Fehlen von tatsächlich gemessenen U-Werten spezifischer Gebäude und Gebäudeelemente verhindert ein exakteres Erfassen des Ist-Zustandes. Demnach fehlt oftmals eine fundierte Berechnungsgrundlage für Investitionen und die Bewertung von möglichen Verbesserungsmassnahmen.

Diese Fallstudie erläutert drei derzeit verfügbare Methoden zur Erhebung von Isolationsdaten. Sie zeigt, dass nur eine dieser drei Methoden dem Benutzer die Möglichkeit bietet, quantitative und aussagekräftige Daten zu erheben. Zusätzlich wird diese Methode, die sogenannte Wärmeflussmethode, anhand eines typischen Schweizer Wohnhauses aus dem Jahr 1948 anschaulich dargestellt und erläutert.

Verfügbare Methoden

Heute wird die Isolationsqualität eines Gebäudes über drei Methoden festgestellt:

1. Wärmebildkamera (bzw. Infrarotkamera)

Diese Methode bildet die Wärmeabstrahlung eines fotografierten oder gefilmten Objekts ab. Sie produziert ein Bild, das Punkte mit verschiedenen Strahlungsdichten in verschiedenen Farben darstellt (typischerweise warme Punkte in rot, und kalte Punkte in blau). Ein Wärmebild hilft, die allgemeine Qualität der Isolation eines Gebäudes zu verstehen. Zusätzlich hilft es, Wärmebrücken und inhomogene Isolationsschichten zu identifizieren. Wärmebildkameras produzieren jedoch keine quantitativen Daten (z.B. U-Werte), welche für die Bewertung von Isolationen gebraucht werden können.

2. Mehrfache Temperaturmessungen

Diese Methode basiert auf drei oder mehr gleichzeitigen Temperaturmessungen im Inneren und Äusseren des Gebäudes. Durch vereinfachende Annahmen ist es möglich, aus diesen Messungen den Wärmefluss durch ein Gebäudeelement zu errechnen. Dieser Wärmefluss erlaubt die Bestimmung des U-Werts. Obwohl diese Methode quantitative Messergebnisse liefert, ist sie für den praktischen Einsatz für In-Situ Messungen nur in wenigen Szenarien geeignet. Um diese Methode einsetzen zu können, ist ein minimaler Temperaturunterschied von 10°C erforderlich. Während so grosse Temperaturunterschiede in vielen Regionen nicht häufig auftreten, kommen sie äusserst selten das ganze Jahr über vor.

3. Wärmeflussmethode

Sobald ein Temperaturunterschied zwischen zwei Seiten eines Gebäudeelements entsteht, fliesst durch dieses Material Wärme. Wärme fliesst immer von der warmen zur kalten Seite. Die Wärmeflussmethode basiert auf diesem Effekt und misst den Wärmefluss sowie die Temperaturen auf beiden Seiten des Elements. Da Temperaturunterschiede von 5 °C für eine zuverlässige Messung ausreichen, funktioniert diese Methode im In-Situ Einsatz und ermöglicht die einfache Berechnung des U-Werts jeglicher Materialien. Die Wärmeflussmethode ist in den Standards ISO 9869, ASTM C1046 und ASTM C1155 beschrieben und standardisiert. Die Wärmeflussmethode ist die einzige Methode, die zuverlässige quantitative Daten über Gebäude und Gebäudeelemente erhebt.

Wie diese kurze Übersicht zeigt, sind die Methoden 1 und 2 zur Ermittlung von aussagekräftigen quantitativen Isolationsdaten (speziell U-Werten) nicht oder nur sehr begrenzt einsetzbar. Die folgenden Abschnitte erklären, wie die Wärmeflussmethode nach ISO 9869 angewendet wird und welche Resultate sie wiedergibt.

Notwendige Messausrüstung

In dieser Fallstudie wird das [gSKIN® U-Wert Kit](#) eingesetzt. Das gSKIN® U-Wert Kit erlaubt Messungen nach ISO 9869, ASTM C1046 und ASTM C1155 und enthält alle notwendigen Komponenten für eine solche

Messung:

- 2 Temperatursensoren
- 1 Wärmeflussensor
- 1 Datenlogger

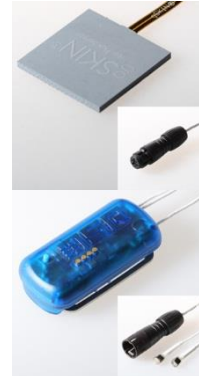
Der Datenlogger hat eine einstellbare Messfrequenz, eine Batterielaufzeit für 1 Monat durchgehende Messungen und Speicherplatz für 2 Millionen Messpunkte.

Das gSKIN® U-Wert Kit loggt automatisch die folgenden Messgrößen:

- Wärmefluss durch das zu untersuchende Gebäudeelement in W/m^2
- Innen- und Aussentemperatur am Messelement in °C

Die im Kit enthaltene Software erstellt aus den Messungen per Knopfdruck die folgenden Resultate bzw. können diese „live“ auf dem Laptop mitverfolgt werden:

- Wärmefluss- und Temperaturgraphen (siehe Abbildungen 4 und 5, Software 1.0, bis Okt. 2014 vertrieben)
- Berechnung des U-Werts (ebenfalls als graphischer Verlauf in Software Version 1.07 (seit Nov. 2014)



*Bild 1:
Wärmefluss-
Sensor;
Datenlogger
mit
Temperatur-
sensoren*

Die Methode Schritt für Schritt

1. Installation Wärmeflussensor
 - Installation des Wärmeflussensors auf der Innenseite des Gebäudeelements. Den Sensor vor direkter Beheizung, Konvektion (Wind) und Sonnenstrahlung abschirmen.
 - Sensor mit handelsüblichem Klebeband auf dem Element befestigen.
 - Optional: Identifikation von repräsentativen/interessanten Stellen auf dem Gebäudeelement durch Wärmebildkamera.
 - Optional: Den Sensor mit dem gleichen Material beschichten wie es in der unmittelbaren Umgebung vorhanden ist (z.B. weissgestrichener Tapete).
 - Optional: Mit mehreren Sensor gleichzeitig messen, um Mittelwerte für inhomogene Bauelemente zu bestimmen.
 - Zusätzliche Informationen sind in der „[Building Physics Application Note](#)“ verfügbar.
2. Installation Temperatursensor
 - Einen Temperatursensor neben dem Wärmeflussensor (innen) anbringen.
 - Den zweiten Temperatursensor gegenüber dem ersten Sensor auf der anderen Seite des Gebäudeelements (in der Regel aussen) anbringen.
 - Vorsicht: Für U-Wert Messungen muss die Luft-/Raumtemperatur gemessen werden. Temperatursensoren so platzieren, dass ein Abstand von 2-10cm vom Gebäudeelement entsteht.
3. Datenaufnahme (nach ISO 9869)
 - Minimale Messdauer: 72h
 - Bedingung für Mess-Ende: der U-Wert unterscheidet sich weniger als $\pm 5\%$ von dem Wert, der 24 Stunden früher gemessen wurde.
 - Typische Aufnahmefrequenz: 1 Datenpunkt pro 0.5 – 1 Stunde (in dieser Fallstudie wurde 1 Datenpunkt pro 10 Minuten aufgezeichnet).
4. Datenanalyse

- Die gSKIN® U-Wert Software analysiert die Daten automatisch. Falls gewünscht, können die Messdaten auch exportiert werden.
- Der U-Wert wird über den Mittelwert des Wärmeflusses und den Mittelwert der Temperaturdifferenz ΔT berechnet. Die folgende Formel zeigt die Berechnung des U-Werts:

$$U\text{-Wert} = \frac{\sum_{j=1}^n \varphi_j}{\sum_{j=1}^n \Delta T_j} \quad [W/(m^2K)]$$

mit n = Anzahl Messpunkte,
 φ = Wärmefluss in W/m^2 ,
 ΔT = Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Aussentemperatur in $^{\circ}C$.

Das Messobjekt

Das Messobjekt dieser Fallstudie wurde 1948 gebaut und seither mehrmals renoviert. Die für diese Fallstudie relevante Renovationen sind die des Zwischendachs 1979 und die Renovation des Erdgeschossbodens 1999. Es wurde jeweils die Isolation erneuert und auf den für die Zeit üblichen Standard verbessert. Zwei Punkte wurden für Messungen ausgewählt:

- A Aussenwand gegen Südost
 Material: Ziegelstein, 25cm dick, 1948 gebaut, nie renoviert
 Die Aussenwand separiert das Wohnzimmer vom Aussenbereich
- B Boden im Erdgeschoss
 Material: Beton, 20cm dick, Keramikplatten oben, 1999 renoviert
 Der Boden separiert das Erdgeschoss vom unbeheizten Keller

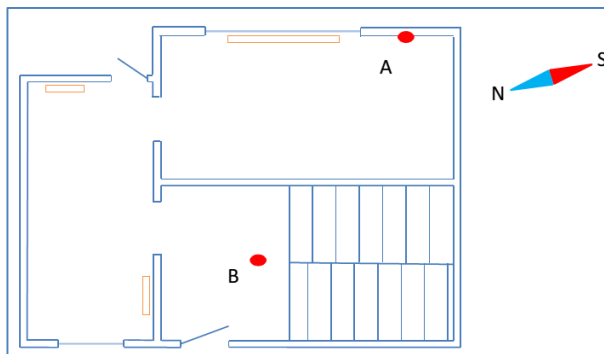
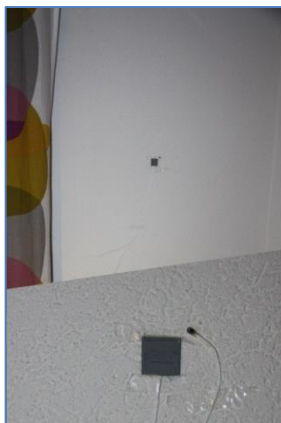
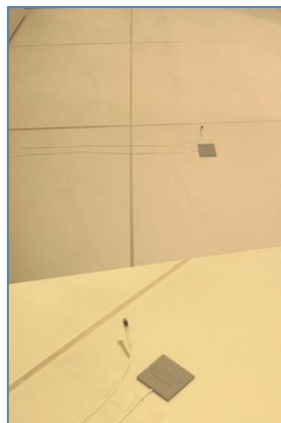


Abbildung 1. Erdgeschoss: Position der Messpunkte A und B.

Die Positionierung der Sensoren wurde bewusst gewählt, um unerwünschte Einflüsse durch Heizungen, laterale Konvektion und Strahlung zu vermeiden. Die Sensoren wurden mit einer minimalen Distanz von 1m von solchen Störquellen platziert.



Messstelle A – Aussenwand



Messstelle B – Erdgeschoss



Abbildung 2. Sensormontage der zwei Messpunkte, jeweils oben Distanzansicht und unten Ansicht im Detail

Resultate

Der folgende Abschnitt zeigt die Temperatur- und Wärmeflussentwicklung über die Messperiode jedes einzelnen Messpunktes. Um dem Leser ein Gefühl für die verschiedenen möglichen Effekte zu geben, ist jede Abbildung im folgenden Abschnitt interpretiert.

Messpunkt A – Aussenwand

Abbildung 3 zeigt die Messresultate für Punkt A. Die Aussentemperatur schwankt um einen Bereich von -1 bis 3°C, mit den tiefsten Punkten jeweils kurz vor Sonnenaufgang. Ohne Heizung würde die Innentemperatur abhängig von der Aussentemperatur schwanken, was jedoch durch das Heizsystem kompensiert wird. Das Heizsystem wird in der Nacht abgeschaltet, und die tiefste Temperatur wird daher kurz vor dem Einschalten der Heizung am Morgen erreicht. Sowohl Aussen- als auch Innentemperatur haben einen 24-Stunden-Zyklus. Die Zeitverzögerung zwischen den Temperaturen resultiert in einer unregelmässigen Temperaturdifferenz, und verursacht dadurch einen stark schwankenden Wärmefluss. Wenn die Aussentemperatur am Nachmittag sinkt und die Innentemperatur durch die Heizung stabilisiert wird, tritt der grösste Wärmefluss auf. Der Ausreisser um 10:04 am 14.12.2013 wurde durch das Lüften (bzw. längerem Öffnen der Fenster) des Wohnzimmers verursacht. Das Lüften führte zu einer schnell sinkenden Innentemperatur und somit zu einer tieferen Temperaturdifferenz und Wärmefluss.

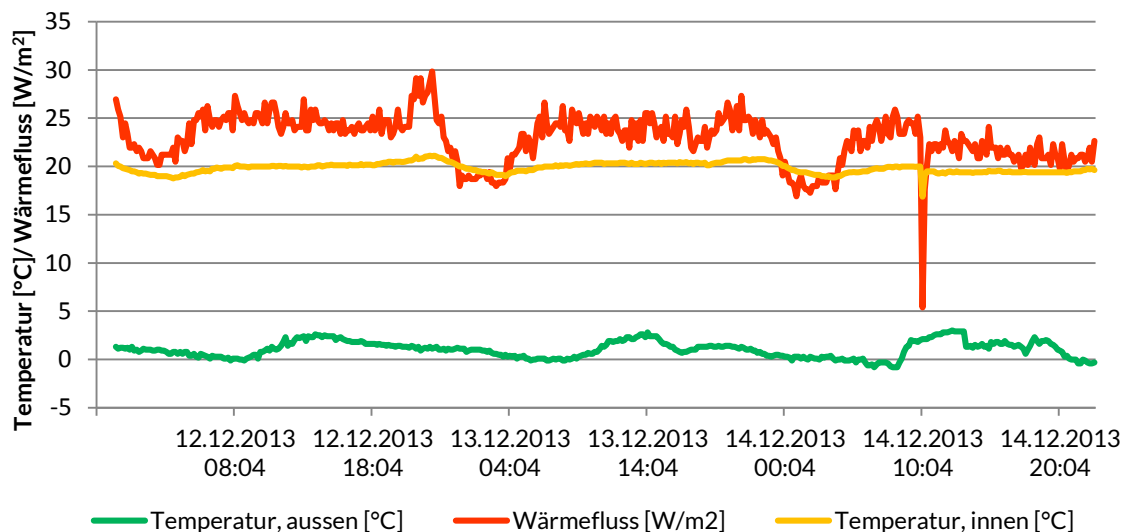


Abbildung 3. Temperatur und Wärmefluss am Messpunkt A. Dieser Graph wurde durch die in der Messausrüstung inbegriffene Software erstellt (Version Jan 2014, noch ohne direkte U-Wert Berechnung in Graphik)

Messpunkt B – Erdgeschoss

Die Temperaturen und der Wärmefluss sind während dem Wochenende über längere Zeit stabil, da das Messobjekt nicht bewohnt war. Ab 09:30 am 03.02.2014 sinken beide Temperaturen, sobald die Türen zum Keller und Erdgeschoss geöffnet werden. Dann erholt sich die Innentemperatur wieder auf das ursprüngliche Niveau mit kleinen Abnahmen, wenn die Türe geöffnet und geschlossen wird. Die Aussentemperatur (in dem Fall die Kellertemperatur) erhöht sich nicht mehr, da das Fenster im Keller für den Rest der Messung geöffnet bleibt. Der Wärmefluss ist stabil, bis beide Temperaturen sich zu verändern beginnen. Ab diesem Zeitpunkt schwankt der Wärmefluss mit derselben Frequenz wie die Innentemperatur, welche den Wärmefluss unmittelbar beeinflusst.

Um genaue U-Werte berechnen zu können, sollte die Temperaturdifferenz mindestens 5°C betragen. In dieser Messung ist die Differenz meist weniger als 5 °C und kann somit nicht zur Berechnung des U-Werts gebraucht werden. Die Messung sollte demnach erst ab Montag 03.02.2014 erfolgen, wenn die Temperaturdifferenz zwischen EG und Keller ausreichend ist.

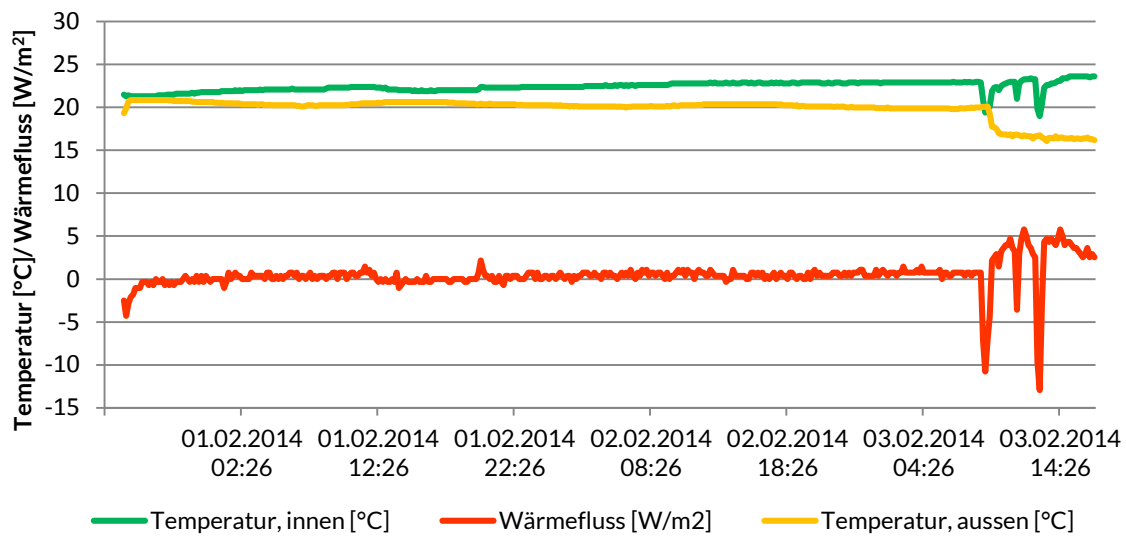


Abbildung 4. Temperatur und Wärmefluss am Messpunkt B. Dieser Graph wurde durch die in der Messausrüstung inbegriffene Software erstellt (Version Jan 2014, noch ohne direkte U-Wert Berechnung in Graphik)

Tabelle 1 fasst die Messresultate zusammen. Zusätzlich enthält die Tabelle für jedes Gebäudeelement die entsprechenden Referenz U-Werte aus der Literatur. Die Referenzwerte sind Werte, die zur jeweiligen Zeitperiode als Standards galten. Durch Vergleich mit den Referenzwerten lassen sich folgende Schlüsse ziehen.

Messpunkt A – Aussenwand

Obwohl der U-Wert im Vergleich zum Standard während der Bauzeit als sehr gut erscheint, ist der U-Wert im Vergleich zum heutigen Standard dennoch sehr hoch. Eine Renovation würde die Isolierung substantiell verbessern. Wie die kalkulierten hohen Heizkosten anzeigen, könnte eine Verbesserung der Isolierung dabei helfen, Heizkosten zu sparen.

Messpunkt B – Erdgeschoss

Wie bereits in der Interpretation der Temperatur- und Wärmeflussmessung von Messpunkt B erwähnt, ist die Temperaturdifferenz nicht gross genug für eine genaue U-Wert Berechnung. Dadurch, dass die Temperaturdifferenz unter 5°C liegt, ist der gemessene U-Wert (0.19 W/m²) nicht als genau zu betrachten. Zusätzlich, zeigt auch der Vergleich mit den Referenzwerten, dass der berechnete U-Wert nicht den erwarteten Werten entspricht. Somit sollte dieser gemessene U-Wert verwendet werden und stattdessen eine neue Messung erfolgen, bei der eine ausreichende Temperaturdifferenz sichergestellt wird.

	Messstelle A Aussenwand	Messstelle B Erdgeschoss
Mittlere ΔT [°C]	18.84	2.52
Mittlerer Wärmefluss [W/m ²]	22.88	0.48
Gemessener U-Wert [W/m ² K]	1.21	0.19 ¹
U-Wert des Referenzelements [W/m ² K]	1.70 ²	0.35 ³
Erreichbarer U-Wert durch Renovation [W/m ² K]	0.25	0.2
U-Wert bei einem Neubau [W/m ² K] ⁴	< 0.15	< 0.2
Fläche [m ²]	50 ⁵	38
Heizkosten pro Tag [kWh]	27.46	k.A. ⁷
Heizkosten pro Monat [EUR] ⁶	140.03	k.A. ⁷

¹ Dieser U-Wert ist fehlerhaft. Da die Temperaturdifferenz unter 5°C liegt, kann der berechnete U-Wert nicht als exakt angesehen werden.

^{2,3} Quelle: Prof. Dr. Wolff, Kennwerte Aussenbauteile, Ostfalia Hochschule,
http://www.energieberaterkurs.de/export/sites/default/de/Dateien_Kennwerte/kennwerte_aussenbauteile.pdf

² U-Wert einer Aussenwand welche vor 1948 verbaut wurde

³ U-Wert eines Bodenelements welches seit 1995 verbaut wird

⁴ Passivhaus-Standard

⁵ Fläche der südöstlichen Aussenwand im Erdgeschoss, Richtung

⁶ Unter den Annahmen: 0.17 EUR/kWh, und 30 Tage/Monat

⁷ Keine Berechnung möglich da min. Temperaturunterschied zu falscher U-Wert Messung / Wärmeflussmessung führte

Tabelle 1: Zusammenfassung der Messresultate. Tiefe U-Werte bezeichnen ein Material mit einer hohen (bzw. guten) thermischen Isolationseigenschaft.

Fazit

Die durchgeführten Messungen zeigen, dass der spezifische U-Wert eines Gebäudeelements ohne grossen Aufwand gemessen werden kann. Durch die quantitative Bestimmung von Isolationseigenschaften wie dem U-Wert können dann wiederum sachgemässe Schlüsse gezogen werden, etwa bei der Entscheidung von energetischen Sanierungsmassnahmen, Ausdimensionierung neuer Heizsysteme, etc. Um ein möglichst vollständiges Bild der Gebäudehülle zu gewinnen, sollte an mehreren verschiedenen Stellen gemessen werden.

Die zwei hier gezeigten Messungen erlauben bereits erste Aussagen über den Zustand des untersuchten Gebäudes und eine Abschätzung möglicher Verbesserungsmassnahmen. An der Aussenhülle eines Gebäudes treten typischerweise die grössten Temperaturunterschiede auf und somit auch die höchsten Wärmeflüsse. Da die Aussenwand beim untersuchten Gebäude den höchsten U-Wert hat, ist die derzeitige Isolierung des Messobjekts als schlecht einzustufen. Die Aussenwand sollte daher unbedingt zeitgemäss isoliert werden. Eine verbesserte Isolierung würde nicht nur Heizenergie sparen und somit die Heizkosten erheblich reduzieren, sondern auch das qualitative Wohlbefinden der Bewohner steigern (z.B. durch Vermeidung „kalter Wände“). Obgleich der U-Wert der zweiten Messung als fehlerhaft einzustufen ist, kann hier als Zwischenfazit aufgezeigt werden, dass es sehr wichtig ist, den minimalen Temperaturunterschied zwischen „innen“ und „ausen“ auf mind. 5 °C sicherzustellen. Sobald diese Temperaturdifferenz auch im 2. Messpunkt erreicht wurde, kann man sehen, dass der gemessene Wärmefluss auch an dieser Stelle über bspw. 72h zu einem exakten U-Wert führen würde.

Die Messungen wurden nacheinander, mit demselben U-Wert Kit, durchgeführt. Alternativ können die Messungen mit mehreren U-Wert Kits gleichzeitig durchgeführt werden. Die Messstandards (ISO 9869, ASTM C1046 und ASTM C1155) erlauben die aufeinanderfolgende und gleichzeitige Messmethode. Der Zeitaufwand pro Messstelle lag für den Messaufbau und die Datenanalyse jeweils bei 10 Minuten, also 20 Minuten total.



Document information

Copyright © greenTEG AG, All rights reserved

Pictures by greenTEG AG

Revision History

Date	Revision	Changes
18. February 2014	1.6 (first published)	Completed content
05. January 2015	1.8	Case study shortened
17. March 2015	1,9	Case study edited for 2 nd measurement