

Bericht EEB3-HRW-1903-E02

**Bestimmung des „Solar Reflectance Index“  
von Betonwerksteinproben  
- Auftrag der Firma Probet – Dasag Sp. Z.o.o.**

**für:**

Probet – Dasag Sp. Z.o.o.  
Kierownik Działu B+R  
ul. Fabryczna 4-6  
68-100 Zagan  
POLEN

**bearbeitet von:**

Dr. Helen Rose Wilson  
Johannes Hanek  
Franz Brucker

29. März 2019

**Anschrift:**

Fraunhofer-Institut  
für Solare Energiesysteme  
Abteilung EEB  
Heidenhofstraße 2  
D-79110 Freiburg

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Das Wichtigste in Kürze</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Beschreibung der Prüfmuster</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Beschreibung der Methoden</b>	<b>6</b>
3.1	Beschreibung der Messung der spektralen normal-hemisphärischen Reflexion im solaren Spektralbereich	6
3.2	Beschreibung der Berechnung des solaren Strahlungsreflexionsgrads und des solaren Absorptionsgrads	8
3.3	Beschreibung der Messung der spektralen normal-hemisphärischen Reflexion im infraroten Spektralbereich	9
3.4	Beschreibung der Berechnung des hemisphärischen thermischen Emissionsgrads bei 300 K und 350 K	10
3.5	Beschreibung der Berechnung des „Solar Reflectance Index“ (SRI-Wert)	10
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>11</b>
4.1	Solare Strahlungsreflexionsgrade nach ASTM E 903-12	11
4.2	Solare Strahlungsabsorptionsgrade nach ASTM E 903-12	12
4.3	Hemisphärische thermische Emissionsgrade	13
4.4	„Solar Reflectance Index“ (SRI-Werte) nach ASTM E 1980-1114	14
4.5	Spektralkurven	15
<b>5</b>	<b>Literatur</b>	<b>15</b>

Dieser Prüfbericht umfasst 15 Seiten. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse darf nicht unvollständig oder in sinnentstellendem Zusammenhang erfolgen. Der Prüfbericht darf ohne die schriftliche Zustimmung des Fraunhofer ISE nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Der Bericht ist Eigentum der Firma Probet – Dasag Sp. Z.o.o., Zagan, Polen. Er darf nicht ohne die schriftliche Genehmigung des Auftraggebers weitergegeben werden. Die Ergebnisse dieses Berichts beziehen sich auf die geprüften Muster. Das Fraunhofer ISE hatte keinen Einfluss auf die Probennahme, hat aber die Position zur Bestimmung des Reflexionsgrades bei jeder Probe ausgewählt.

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE  
Abteilung Energieeffiziente Gebäude  
TestLab Solar Façades

Freiburg, 29. März 2019

Dr. Helen Rose Wilson  
TestLab Solar Façades  
Autorin dieses Berichts

Dipl. Ing. (FH) Ulrich Amann  
Technischer Leiter  
TestLab Solar Façades

## 1 Das Wichtigste in Kürze

Die spektrale Reflexion im solaren und im IR-Spektralbereich wurden im Labor an Betonwerksteinproben vermessen, die von der Firma Probet – Dasag Sp. Z.o.o. bereit gestellt wurden. Daraus wurden der solare Reflexionsgrad, der solare Absorptionsgrad, der thermische Emissionsgrad und anschließend der „Solar Reflectance Index“ (SRI-Wert) ermittelt.

In der Norm ASTM E 1980-11 wird der „Solar Reflectance Index“ (SRI-Wert) wie folgt definiert:

Der SRI-Wert ist die relative Temperatur einer Oberfläche in Bezug auf eine weiße Standardoberfläche (SRI = 100) und eine schwarze Standardoberfläche (SRI = 0) unter Standardbedingungen (Sonneneinstrahlung  $1000 \text{ Wm}^{-2}$ , Umgebungstemperatur 310 K, Himmelstemperatur 300 K). Er wird aus einer Energiebilanz unter Berücksichtigung des radiativen und konvektiven Wärmeaustausches zwischen der Oberfläche und seiner Umgebung im Gleichgewichtszustand berechnet.

Wir weisen ausdrücklich darauf hin, dass sowohl SRI-Werte über 100 als auch negative SRI-Werte möglich sind.

## 2 Beschreibung der Prüfmuster

In der folgenden Auflistung sind die für diesen Bericht verwendeten Proben dargestellt. Die Proben wurden am 15.02.2019 beim Fraunhofer ISE angeliefert.

Von jeder Betonwerksteinart wurden drei Muster geliefert.

Tabelle 1 Kennzeichen und Beschreibungen der untersuchten Proben.

ISE- Kennung	Bezeichnung Probet – Dasag	Dicke [mm]	Fläche [mm <sup>2</sup> ]
DV396001	INDIGO PRATO 7430 Probe 1 von 3	40	49 x 49
DV396002	INDIGO PRATO 7430 Probe 2 von 3	40	49 x 49
DV396003	INDIGO PRATO 7430 Probe 3 von 3	40	49 x 49
DV396004	INDIGO PRATO 7431 Probe 1 von 3	40	49 x 49
DV396005	INDIGO PRATO 7431 Probe 2 von 3	40	49 x 49
DV396006	INDIGO PRATO 7431 Probe 3 von 3	40	49 x 49

### 3 Beschreibung der Methoden

Das TestLab Solar Façades ist für thermisch-optische Prüfungen von Fenstern, Fassaden und anderen Produkten nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005 im Jahr 2006 akkreditiert worden. Die Akkreditierung umfasst die messtechnische und rechnerische Bestimmung von g-Wert, Transmissionsgrad, Reflexionsgrad und U-Wert. In der flexiblen Akkreditierung sind auch am Fraunhofer ISE entwickelte Verfahren enthalten, die über den in Normen festgelegten Stand der Technik hinausgehen. Die DAkkS-Registriernummer für die Akkreditierung ist D-PL-11140-03-01.

Die Spektralmessungen im infraroten Spektralbereich (s. Kap. 3.3) gehören nicht zu den Dienstleistungen des TestLab Solar Façades und sind nicht in der Akkreditierung nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005 enthalten. Die Prüfmittel werden jedoch im Rahmen unseres nach ISO 9001:2015 zertifizierten Qualitätsmanagementsystems überwacht und regelmäßig rückführbar kalibriert.

#### 3.1 Beschreibung der Messung der spektralen normal-hemisphärischen Reflexion im solaren Spektralbereich

Die spektralen nah-normal-hemisphärischen Reflexionsgrade  $R_{nh}(\lambda)$  wurden über einen Wellenlängenbereich von 280 nm bis 2500 nm ermittelt. Die Messungen erfolgten mit einem Perkin-Elmer Lambda-900 Zweistrahl-spektrometer mit Ulbrichtkugelzusatz (siehe Abbildung 1 und Abbildung 2). Die Ulbrichtkugel hat einen Durchmesser von 220 mm und ist innen mit weißem PTFE beschichtet. Die Reflexionsmessungen wurden mit einem Einfallswinkel von 8 Grad durchgeführt. Als Referenz wird ein diffus reflektierender Weißstandard aus PTFE verwendet, dessen spektrale Reflexionsgrade rückführbar auf PTB-Messungen bestimmt wurden.

Der Reflexionsgrad der Betonwerksteinarten wurde im solaren Spektralbereich an je einer Position bei jeder der sechs Proben vermessen, um die Auswirkung sichtbarer Inhomogenität zu quantifizieren.

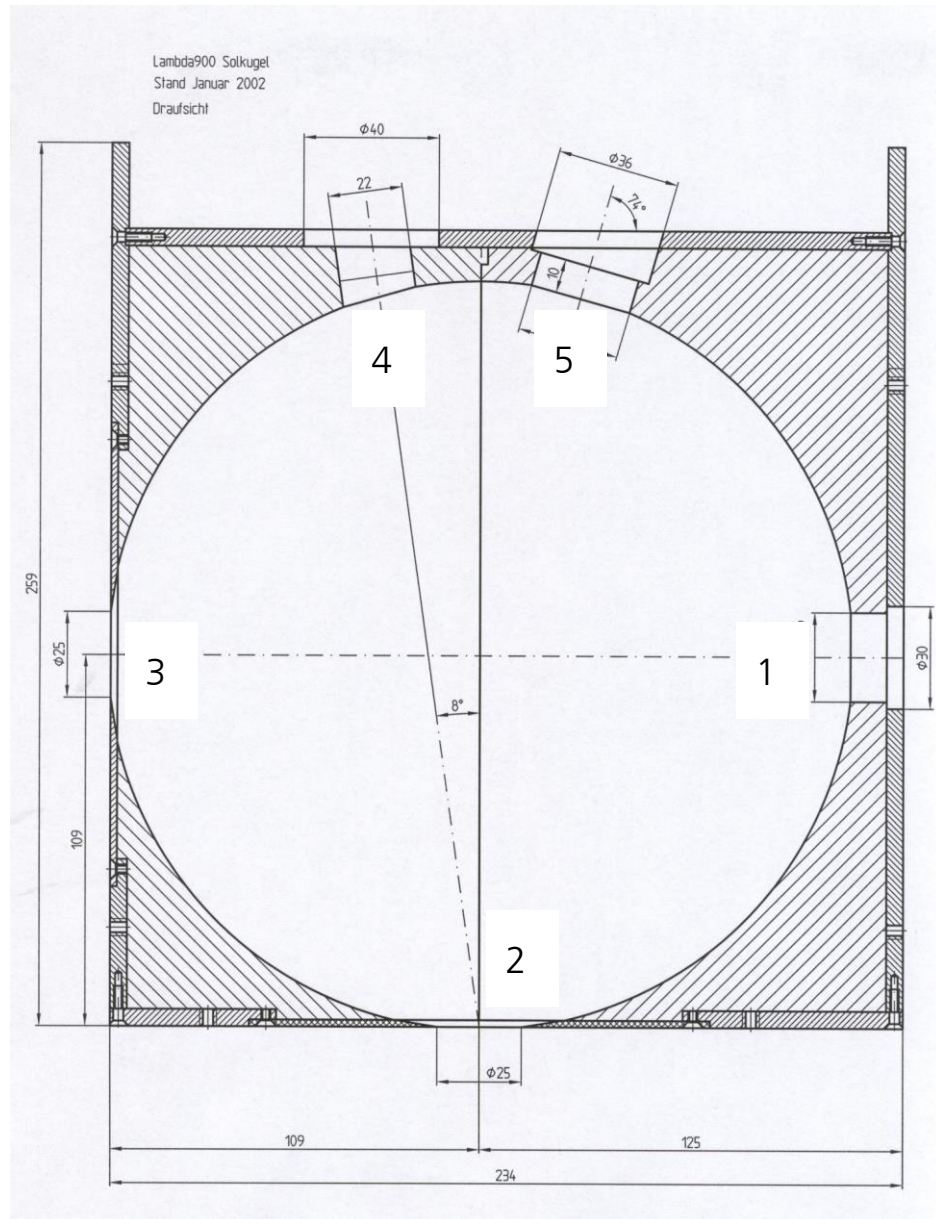


Abbildung 1

Horizontaler Schnitt durch die Ulbrichtkugel zur Bestimmung des normal-hemisphärischen Transmissions- oder Reflexionsgrads im solaren Spektralbereich. Die Transmissionsprobenapertur befindet sich links (3); der Referenzstrahl für Transmissionsmessungen tritt oben in die Kugel ein (4). Der Einfallswinkel auf der Probe beträgt für Transmission  $0^\circ$ . Die Glanzfalle für normal-diffuse Transmissionsmessungen befindet sich rechts (1) und dient gleichzeitig als Reflexionsreferenzapertur. Der Referenzstrahl für Reflexionsmessungen tritt links in die Kugel ein (3). Der Probenstrahl für Reflexionsmessungen tritt oben in die Kugel ein (4); die Reflexionsprobenapertur befindet sich unten (2). Der Einfallswinkel auf der Probe beträgt für Reflexion  $8^\circ$ . Die Reflexionsglanzfalle ist mit (5) gekennzeichnet.

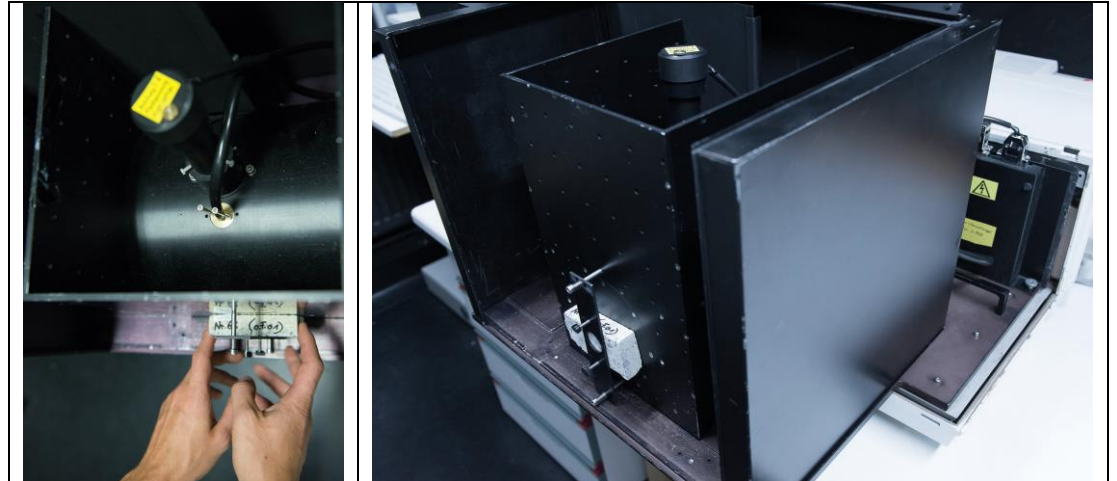


Abbildung 2

Fotos einiger Schritte des Messablaufs für die Reflexionsmessungen im solaren Spektralbereich. Die abgebildete Probe dient als Beispiel, sie gehört nicht zu den in diesem Bericht besprochenen Proben. (links) Blick von oberhalb auf die Ulbrichtkugel; die Orientierung entspricht dem horizontalen Schnitt durch die Ulbrichtkugel in Abbildung 1. Die Probe wird gerade an der Reflexionsprobenapertur eingebaut. (rechts) Blick auf die Messapparatur mit eingebauter Probe an der Reflexionsprobenapertur der Ulbrichtkugel.

### 3.2 Beschreibung der Berechnung des solaren Strahlungsreflexionsgrads und des solaren Absorptionsgrads

Der solare Strahlungsreflexionsgrad wird durch Gewichtung der gemessenen nah-normal-hemisphärischen Reflexionsspektren im solaren Spektralbereich mit der hemisphärischen (globalen), solaren Spektralkurve nach ASTM G 173-03(2012), Tabelle 2 und Integration gemäß ASTM E 903-12 berechnet. Die Verwendung dieser Normen wird laut Informationen des „U.S Green Building Councils“ für die Berechnung des „Solar Reflectance Index“ nach ASTM E 1980-11 zur Verwendung in der LEED-Zertifizierung verlangt. Zur Berechnung des solaren Strahlungsreflexionsgrads wurde ein am Fraunhofer ISE geschriebenes und validiertes Programm zusammen mit dem vorgeschriebenen ASTM-Spektrum für hemisphärische solare Strahlung (ASTM G 173-03(2012)) verwendet.

Bei diesen opaken Proben lässt sich der solare Absorptionsgrad  $A$  aus dem solaren Reflexionsgrad  $R$  wie folgt berechnen:

$$A = 1 - R$$



### 3.3 Beschreibung der Messung der spektralen normal-hemisphärischen Reflexion im infraroten Spektralbereich

Der spektrale normal-hemisphärische Reflexionsgrad  $R_{nh}(\lambda)$  für nahezu senkrechte Einstrahlung ( $8^\circ$  zur Probennormalen) wurde im Wellenlängenbereich  $1,6 \mu\text{m}$  bis  $25 \mu\text{m}$  bestimmt. Hierzu wird ein hochempfindliches Fourier-Spektrometer Vertex 80 der Firma Bruker verwendet, das für den mittleren Infrarot-Bereich ( $1,7 \mu\text{m}$ - $25 \mu\text{m}$ ) mit zwei verschiedenen diffus-goldbeschichteten integrierenden Kugeln ausgestattet ist. Zur Kalibrierung werden diffus reflektierende Vergleichsstandards von NIST und NPL verwendet.

Die Prüfmittel werden im Rahmen unseres nach ISO 9001:2015 zertifizierten Qualitätsmanagementsystems überwacht und regelmäßig rückführbar kalibriert. Wie in der Einleitung zu Kapitel 3 erwähnt wurde, sind diese Prüfungen aber nicht nach ISO 17025:2005 akkreditiert.

Der Reflexionsgrad im IR-Spektralbereich wurde jeweils an einer Probe der beiden Betonwerksteinarten vermessen.

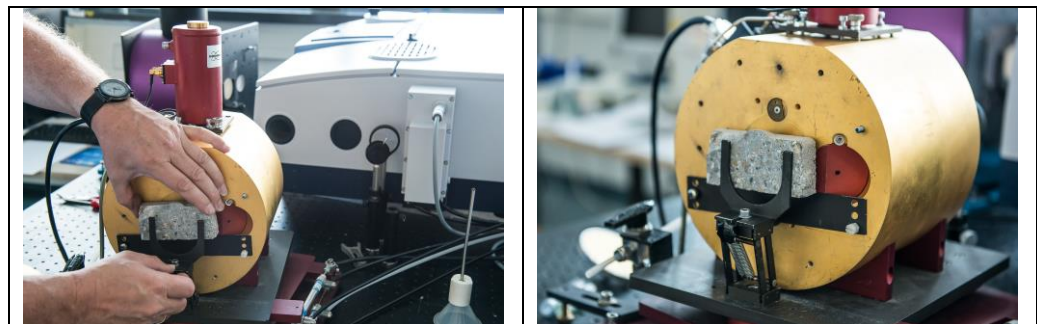


Abbildung 3

Fotos einiger Schritte des Messablaufs für die Reflexionsmessungen im infraroten Spektralbereich. Die abgebildete Probe dient als Beispiel, sie gehört nicht zu den in diesem Bericht besprochenen Proben. (links) Blick auf die Reflexionsprobenapertur der Ulbrichtkugel beim Einbau der Probe. Im Hintergrund ist das Fourier-Spektrometer zu sehen. (rechts) Blick auf die eingebaute Probe an der Reflexionsprobenapertur der goldbeschichteten Ulbrichtkugel.

### **3.4 Beschreibung der Berechnung des hemisphärischen thermischen Emissionsgrads bei 300 K und 350 K**

Der hemisphärische thermische Emissionsgrad wird anhand der gemessenen normal-hemisphärischen Reflexionsspektren ( $R_{nh}(\lambda)$ ) im infraroten Spektralbereich ermittelt. Dafür wird die Funktion  $(1 - R_{nh}(\lambda))$  mit dem Spektrum für Plancksche Schwarzkörperstrahlung bei 300 K und 350 K (27 °C und 77 °C) gewichtet.

Diese Bestimmungsmethode, die auf Spektralmessungen mit einem hochwertigen IR-Spektrometer beruht, liefert genauere thermische Emissionsgrade als die in ASTM E 1980-11 zitierte Norm ASTM E 408-13, die von einem tragbaren Emissometer ausgeht.

### **3.5 Beschreibung der Berechnung des „Solar Reflectance Index“ (SRI-Wert)**

Der „Solar Reflectance Index“ (SRI-Wert) wurde gemäß ASTM E 1980-11 aus dem oben beschriebenen solaren Strahlungsreflexionsgrad und dem hemisphärischen thermischen Emissionsgrad für 300 K und 350 K errechnet. Dazu wurde ein EXCEL-Werkzeug von der „Heat Island Group“ bei LBNL verwendet. Dieses Werkzeug implementiert die SRI-Berechnung nach Gleichungen 1 und 3 in ASTM E 1980-11.

Bei der Berechnung wurde für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten der mittlere in ASTM E 1980-11 vorgeschriebene Wert von  $12 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  verwendet, der „mittleren Windbedingungen“ entspricht. Im Absatz 8.1.2 der ASTM E 1980-11 wird darauf hingewiesen, dass der SRI-Wert bei nichtmetallischen Oberflächen nicht sensitiv vom Wert des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten abhängt.

## 4 Ergebnisse

Die Messungen wurden vom 22.02.2019 bis zum 15.03.2019 durchgeführt.

### 4.1 Solare Strahlungsreflexionsgrade nach ASTM E 903-12

Tabelle 2 Solare Strahlungsreflexionsgrade nach ASTM E 903-12 für die Proben DV396001 bis DV396006. Die Ergebnisse gelten für nahezu senkrechten Lichteinfall. Rnh = nah-normal-hemisphärischer Reflexionsgrad. Die Gesamtmessunsicherheit ohne Berücksichtigung einer Unsicherheit der Wellenlängenkalibrierung beträgt 0,02 absolut. Nur zwei Nachkommazahlen sind signifikant. Die dritte Nachkommazahl wird nur verwendet, um kleine Unterschiede anzudeuten.

ISE-Kennung	Bezeichnung Probet – Dasag	Solarer Strahlungsreflexionsgrad Rnh [-] (Gewichtung mit ASTM G 173-03(2012) hemisphärisch)
DV396001	INDIGO PRATO 7430 Probe 1 von 3	0,701
DV396002	INDIGO PRATO 7430 Probe 2 von 3	0,696
DV396003	INDIGO PRATO 7430 Probe 3 von 3	0,689
DV396004	INDIGO PRATO 7431 Probe 1 von 3	0,592
DV396005	INDIGO PRATO 7431 Probe 2 von 3	0,596
DV396006	INDIGO PRATO 7431 Probe 3 von 3	0,616

Die Gesamtmessunsicherheit ohne Berücksichtigung einer Unsicherheit der Wellenlängenkalibrierung beträgt 0,02 absolut. Bei diesem Spektralverlauf erwarten wir keine signifikante Vergrößerung der Messunsicherheit bei Einbeziehung der Wellenlängenkalibrierung.

## 4.2 Solare Strahlungsabsorptionsgrade nach ASTM E 903-12

Tabelle 3 Solare Strahlungsabsorptionsgrade nach ASTM E 903-12 für die Proben DV396001 bis DV396006. Die Ergebnisse gelten für nahezu senkrechten Lichteinfall. Die Gesamtmessunsicherheit ohne Berücksichtigung einer Unsicherheit der Wellenlängenkalibrierung beträgt 0,02 absolut. Nur zwei Nachkommazahlen sind signifikant. Die dritte Nachkommazahl wird nur verwendet, um kleine Unterschiede anzudeuten.

ISE-Kennung	Bezeichnung Probet – Dasag	Solare Strahlungsabsorptionsgrad Anh [-] (Gewichtung mit ASTM G 173-03(2012) hemisphärisch)
DV396001	INDIGO PRATO 7430 Probe 1 von 3	0,299
DV396002	INDIGO PRATO 7430 Probe 2 von 3	0,304
DV396003	INDIGO PRATO 7430 Probe 3 von 3	0,311
DV396004	INDIGO PRATO 7431 Probe 1 von 3	0,408
DV396005	INDIGO PRATO 7431 Probe 2 von 3	0,404
DV396006	INDIGO PRATO 7431 Probe 3 von 3	0,384

Die Gesamtmessunsicherheit ohne Berücksichtigung einer Unsicherheit der Wellenlängenkalibrierung beträgt 0,02 absolut. Bei diesem Spektralverlauf erwarten wir keine signifikante Vergrößerung der Messunsicherheit bei Einbeziehung der Wellenlängenkalibrierung.

### 4.3 Hemisphärische thermische Emissionsgrade

Tabelle 4 Hemisphärische thermische Emissionsgrade bei 300 K und 350 K (27 °C und 77 °C) für die Proben DV396001 und DV396004. Die Gesamtmessunsicherheit beträgt 0,02 absolut.

ISE-Kennung	Bezeichnung Probet – Dasag	Hemisphärischer thermischer Emissionsgrad bei 300 K [-]	Hemisphärischer thermischer Emissionsgrad bei 350 K [-]
DV396001	INDIGO PRATO 7430 Probe 1 von 3	0,935	0,933
DV396004	INDIGO PRATO 7431 Probe 1 von 3	0,933	0,933

#### 4.4 „Solar Reflectance Index“ (SRI-Werte) nach ASTM E 1980-11

Tabelle 5 „Solar Reflectance Index“ (SRI-Werte) nach ASTM E 1980-11, Gleichungen 1 und 3 für die Proben DV396001 bis DV396006. Neben den Werten der Einzelproben ist auch für jede Betonwerksteinart der aus den jeweils drei Einzelproben ermittelte Mittelwert sowie die Standardabweichung (als Maß für die Schwankungsbreite der Proben) angegeben. Zusätzlich ist noch die Gesamtmessunsicherheit zu berücksichtigen, die 2 beträgt.

ISE-Kennung	Bezeichnung Probet – Dasag	„Solar reflectance index“ (SRI-Wert) nach ASTM E 1980-11, Gleichungen 1 und 3, bei 300 K [-]	„Solar reflectance index“ (SRI-Wert) nach ASTM E 1980-11, Gleichungen 1 und 3, bei 350 K [-]
DV396001	INDIGO PRATO 7430 Probe 1 von 3	86,8	86,8
DV396002	INDIGO PRATO 7430 Probe 2 von 3	86,1	86,0
DV396003	INDIGO PRATO 7430 Probe 3 von 3	85,1	85,1
<b>Mittelwert ± Standard- abweichung (DV396001 – DV396003)</b>	<b>INDIGO PRATO 7430</b>	<b>86,0 ±0,9</b>	<b>86,0 ±0,9</b>
DV396004	INDIGO PRATO 7431 Probe 1 von 3	71,9	71,9
DV396005	INDIGO PRATO 7431 Probe 2 von 3	72,4	72,4
DV396006	INDIGO PRATO 7431 Probe 3 von 3	75,1	75,1
<b>Mittelwert ± Standard- abweichung (DV396004 – DV396006)</b>	<b>INDIGO PRATO 7431</b>	<b>73,1 ± 1,7</b>	<b>73,1 ± 1,7</b>

## 4.5 Spektralkurven

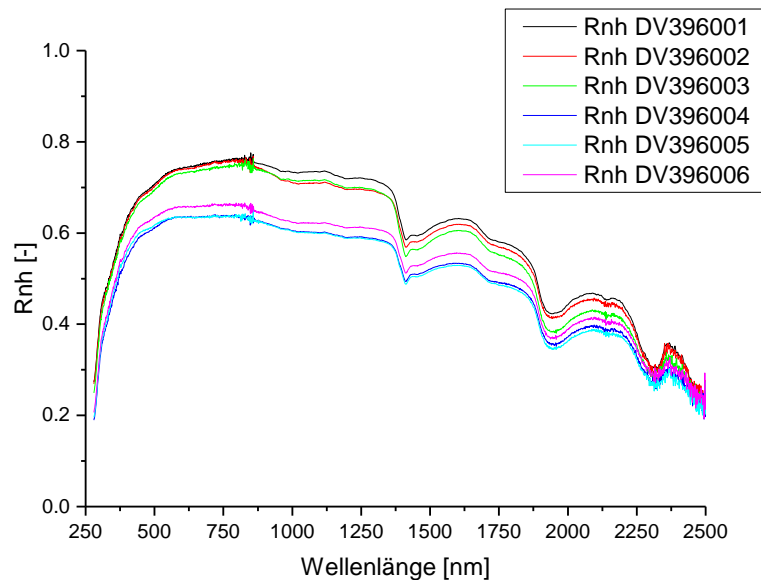


Abbildung 4 Spektren der nah-normal-hemisphärischen Reflexion (Rnh) für die Betonwerksteinproben DV396001 bis DV396006 im solaren Spektralbereich.

## 5 Literatur

ASTM E 408-13 Standard Test Methods for Total Normal Emittance of Surfaces Using Inspection-Meter Techniques

ASTM E 903-12 Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres

ASTM E 1980-11 Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces

ASTM G 173-03 (reapproved 2012) Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37 ° Tilted Surface