

Belastung waagrecht
eingebauter Materialien durch
solare Strahlung im UV-Bereich
und deren experimentelle
Simulation in verkürzter Zeit

Datum: 06.08.1998

Name: Dipl.-Ing. Leo Baumann

**Belastung von waagrecht eingebauten Materialien an der Erdoberfläche
durch solare Strahlung im UV-Bereich**

Die vom Stern Sonne ausgehende Strahlung wirkt in irgendeiner Form auf organische und anorganische Materialien. Insbesondere auf der Erdoberfläche sind in allen Bereichen sowohl positive als auch negativ zu bewertende Reaktionen feststellbar.

Zu den negativen gehört die Veränderungen an Materialien, die aufgrund ihrer Verwendung lange Zeit einem Außenklima ausgesetzt sind. Oft werden diese Veränderungen hervorgerufen durch die Kombination von Strahlungsbelastung unter Anwesenheit von chemischen Stoffen aus Atmosphäre und Umwelt (Foto-Oxidation).

Der Teil, der von der Sonne ausgehenden Strahlung, der die Erdoberfläche erreicht, ist das Sonnenspektrum an der Erdoberfläche, was sich durch diverse Filterprozesse in der Atmosphäre vom Raumspektrum unterscheidet.

Strahlung bedeutet hier transversale, polarisierbare elektromagnetische Wellen verschiedener Längen, vom Infrarot- über den Bereich des sichtbaren Lichts bis hin zu den nicht sichtbaren ultra-violetten Strahlen.

Während der Ausbreitung läßt sich diese Strahlung vorteilhaft als Welle darstellen. Im freien Raum gilt

$$\lambda * f = c$$

mit der Wellenlänge λ
der Frequenz f
und der Lichtgeschwindigkeit c

Findet ein Energieaustausch zwischen Strahlung und Materie statt, verhält sich der betrachtete Spektralbereich so als ob die Strahlung aus diskreten Quanten der Energie

$$W = h * f = h * c / \lambda$$

mit der Energie W
der Frequenz f
dem Planck'schen Wirkungsquantum $h = 6.626 * 10^{-34} \text{ Js}$

bestünde.

Aus der Lichttechnik ist bekannt, daß ein auf eine Ebene fallender Strahlenfluß Φ die Bestrahlungsstärke E hervorruft. E ist eine Funktion des Einfallswinkels Φ und nimmt mit kleiner werdendem Winkel ab. Um die Bestrahlungsstärke einer waagerechten Ebene durch die Sonne auf der Erdoberfläche berechnen zu können, muß der Stand der Sonne nach Tages- und Jahreszeit berücksichtigt werden.

Der Sonnenbildpunkt ist der Punkt auf der Erdoberfläche, über dem die Sonne senkrecht zu sehen ist. Da die Erde sich in etwa 24 Stunden einmal um sich selbst dreht, berechnet sich die geografische Länge des Sonnenbildpunktes ungefähr mit

$$\lambda_{\text{Sonne}} = 2 * \pi / 24 * t - \pi \quad (1)$$

mit der Zeit t in Stunden

und dem Winkel λ in Bogenmaß

Entsprechend berechnet sich die geografische Breite des Bildpunktes etwa mit

$$\varphi_{\text{Sonne}} = \text{nWK} * \sin (2 * \pi / 365 / 24 * t - \pi/2) \quad (2)$$

mit der Zeit t in Stunden

dem Winkel φ in Bogenmaß

und dem Breitenwinkel nWK des Wendekreises von etwa 23.5 Grad

Die geografischen Koordinaten der bestrahlten Ebene seien λ_{Ebene} und φ_{Ebene} .

Der Kosinus des Großkreiswinkel im Erdmittelpunkt zwischen dem Bildpunkt der Sonne auf der Erdoberfläche und der Ebene ist nach [1] Gleichung (3)

$$\cos(e) = \sin(\varphi_{\text{Ebene}}) * \sin(\varphi_{\text{Sonne}}) + \cos(\varphi_{\text{Ebene}}) * \cos(\varphi_{\text{Sonne}}) * \cos(\lambda_{\text{Sonne}} - \lambda_{\text{Ebene}})$$

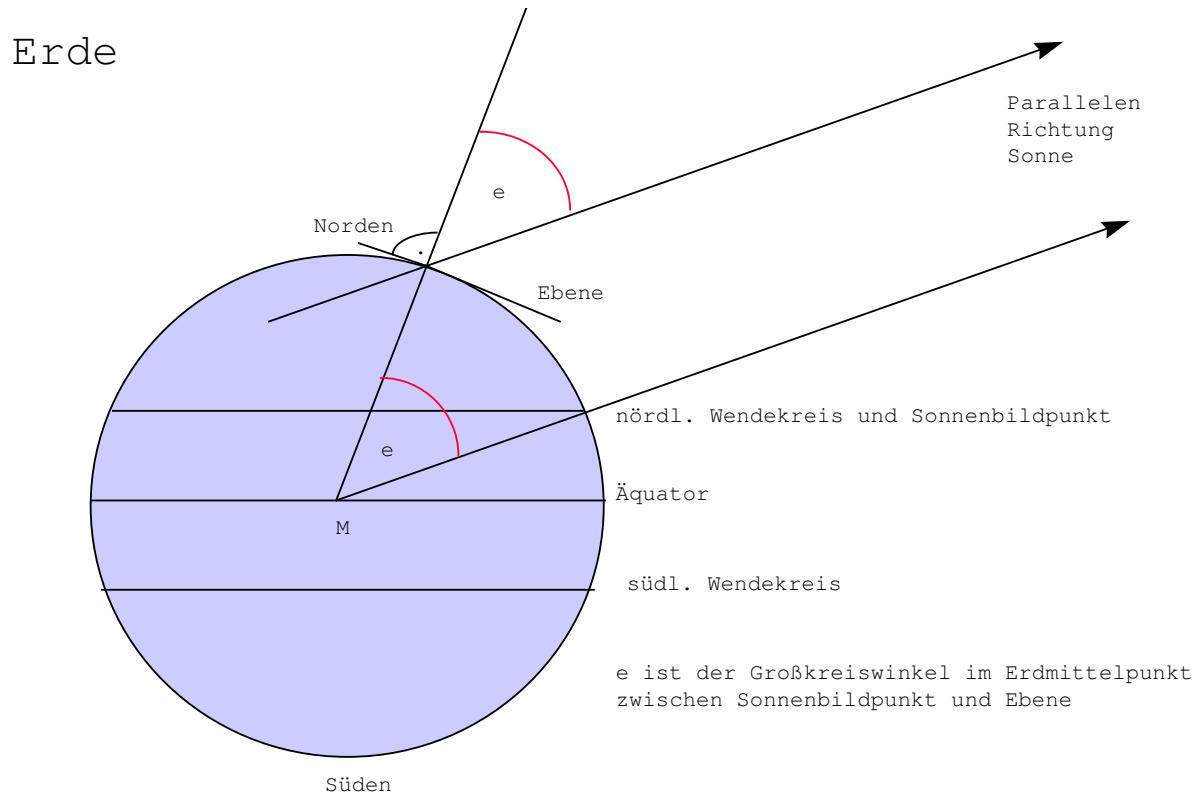


Bild 1 - Einfallswinkel von Sonnenstrahlung auf ebene Flächen

Wie in Bild 1 zu erkennen ist entspricht der Winkel e dem Einfallswinkel der Strahlung zum Flächennormalenvektor der Ebene. Hat die Ebene die Fläche A , ergibt sich der aus Richtung der Sonne sichtbare Teil dieser Fläche mit der Größe

$$A_{\text{Ebene, wirk}} = A_{\text{Ebene}} \cdot \cos(e) \quad (4)$$

Dies ist der Teil der Oberfläche der Ebene, der im rechten Winkel vom Strahlungsfluß Φ der Sonne durchflutet wird. Mit der Zeitabhängigkeit der geografischen Koordinaten des Sonnenbildpunktes ergibt sich auch eine Zeitabhängigkeit dieser wirksamen Fläche. Über ein Jahr betrachtet ergeben sich relative Maxima für $\cos(e)$ zur Mittagszeit und ein absolutes Maximum gegen Mittag des längsten Tages des Jahres.

Die auf die Ebene einfallende Strahlungsenergie W berechnet sich als Summe aller infinitesimalen Energiemengen als Funktion der Zeit.

$$W = \int_{t_1}^{t_2} E_{\text{mittel, senkrecht}} * \cos(e) dt \quad (5)$$

$E_{\text{mittel, senkrecht}}$ ist die aus Richtung der Sonne einfallende wetterabhängige mittlere Bestrahlungsstärke. Die mittlere Strahlungsenergie für eine Stunde ist

$$W_{\text{mittel}} = 1/(t_2 - t_1) * \int_{t_1}^{t_2} E_{\text{mittel, senkrecht}} * \cos(e) dt \quad (5a)$$

Damit folgt mit (1), (2), (3) und (5a) die auf die Ebene eingestrahelte, über ein Jahr gemittelte Energie in einer Stunde

$$W_{\text{mittel}} = E_{\text{mittel, senkrecht}} / 365 / 24 * \int_0^{365*24} \sin(\varphi_{\text{Ebene}}) * \sin(\sin(2*\pi/365/24*t - \pi/2) * n_{\text{WK}}) + \cos(\varphi_{\text{Ebene}}) * \cos(\sin(2*\pi/365/24*t - \pi/2)) * \cos(2*\pi/365/24*t - \pi - \lambda_{\text{Ebene}}) dt \quad (6)$$

Die Integration erfolgt sinnvollerweise numerisch nach einem angepaßten Simpson-Algorithmus mit den geografischen Koordinaten von Offenbach (hier wurden die weiter unter verwendeten Meßwerte aufgenommen) $\lambda_{\text{Ebene}} = 8.766^\circ$ Ost und $\varphi_{\text{Ebene}} = 50.1^\circ$ Nord.

```

DECLARE FUNCTION F# (t#)
'
CLS
PRINT "Numerische Integration nach SIMPSON"
PRINT STRING$(80, "-"): PRINT
INPUT "untere Intervallgrenze:"; UG#
INPUT "obere Intervallgrenze:"; OG#
INPUT "Mantissenstellen      "; GS&
INPUT "min. Intervallzahl    "; Nmin&
PRINT
PRINT "Integral"; TAB(30); "Fehler"; TAB(60); "Intervalle": PRINT STRING$(80, "-")
PRINT
'
pi# = 4 * ATN(1#)
'
N& = 1
Test# = 10 ^ (-GS&) / 2
'
      SW# = (OG# - UG#) / 2
      C# = F#(UG#) + F#(OG#)
      U# = F#(UG# + SW#)
      SA# = SW# / 3 * (C# + 4 * U#)
      DO
      SW# = SW# / 2
      N& = 2 * N& + 1
      G# = G# + U#
      U# = 0
      '
      FOR t& = 1 TO N& STEP 2
          x# = UG# + t& * SW#
          U# = U# + F#(x#)
      NEXT t&
      '
      S# = SW# / 3 * (C# + 2 * G# + 4 * U#)
      IF S# = 0 THEN S# = Test#
      '
      FE# = ABS((S# - SA#) / (15 * S#))
      PRINT S#; TAB(30); FE#; TAB(60); N&
      IF FE# < Test# AND N& >= Nmin& THEN EXIT DO
      SA# = S#
      LOOP
      '
      PRINT STRING$(80, "-"): PRINT
      PRINT "Das Integral hat den Wert "; S#
END

```

```

FUNCTION F# (t#)
pi# = 4 * ATN(1)
bb# = 51.46 * pi# / 180
lb# = 7.01 * pi# / 180
nwk# = 23.5 * pi# / 180
ls# = 2 * pi# / 24 * t# - pi#
bs# = SIN(2 * pi# / 365 / 24 * t# - pi# / 2) * nwk#
cose# = SIN(bb#) * SIN(bs#) + COS(bb#) * COS(bs#) * COS(ls# - lb#)
IF cose# < 0 THEN cose# = 0
F# = cose#
END FUNCTION

```

Numerische Integration nach SIMPSON

```

-----
untere Intervallgrenze:? 0
obere Intervallgrenze:? 8760
Mantissenstellen      :? 7
min. Intervallzahl    :? 32767

```

Integral	Fehler	Intervalle
1580.901942357552	.1518468323441146	3
1332.765307550181	1.241211954331166D-02	7
1925.905643452464	2.053199708645445D-02	15
1886.655747210337	1.386930155829553D-03	31
1800.6754144889	3.183262311079008D-03	63
1824.001021234242	8.525436288611295D-04	127
1823.962336960014	1.413928107464362D-06	255
1823.051879349826	3.329426589560598D-05	511
1827.327271052187	1.559797842488455D-04	1023
1826.139010315161	4.337971097542161D-05	2047
1826.186465463269	1.732395130713655D-06	4095
1826.162622160692	8.704337093691372D-07	8191
1826.183945288333	7.78422045791495D-07	16383
1826.178333416043	2.048676257022282D-07	32767
1826.179484257939	4.201273405732985D-08	65535

Das Integral hat den Wert 1826.179484257939

Berechnung des Integrals für Offenbach

Das Integral für sich genommen nimmt einen Wert von 1826.1795 Stunden an. Als Interpretation dieser Zahl könnte man angeben: Von den 8760 Stunden eines Jahres hat die Sonne die betrachtete Ebene 1826.1795 Stunden senkrecht bestrahlt.

Die dort eingestrahelte Energie ist demnach

$$W = E_{\text{mittel, senkrecht}} / 365 / 24 * 1826.1795 \text{ h} = 0.2085 \text{ h} * E_{\text{mittel, senkrecht}}$$

Etwa 20 % der aus Sonnenrichtung einfallenden Energie wirken an den angegebenen geografischen Daten auf die Ebene.

Energie der solaren Strahlung im UV-Bereich

Von Interesse ist die Energie im UV-Bereich an der Erdoberfläche. Das Umweltbundesamt und das Bundesamt für Strahlenschutz betreiben ein Meßnetz, das u. a. den UV-Anteil der Sonnenstrahlung festhält.

Meßstation Offenbach h=110 m ü.N.N., $\lambda=8.766^\circ$ Ost, $\Phi=50.1^\circ$ Nord

Die Strahlendosis im Bereich der Wellenlänge von $320 \text{ nm} \leq \lambda \leq 400 \text{ nm}$ (UV-A) und $290 \leq \lambda \leq 320 \text{ nm}$ (UV-B) werden folgendermaßen gemessen [3].

$$D_{UV} = \int_{\text{Tag}} \int_{\lambda} I(\lambda, t) d\lambda dt$$

Die Meßwerte können dem „Bericht aus dem solaren UV-Messnetz“ entnommen werden. Die Summation der Tagesdosen über das Jahr 1997 liefert folgende Ergebnisse [3]

$$D_{UV-A} = 773 \text{ MJ/m}^2 = 214722.2222 \text{ Wh/m}^2$$

$$D_{UV-B} = 30940 \text{ kJ/m}^2 = 8594.4444 \text{ Wh/m}^2$$

Diese Messungen beziehen sich laut Auskunft vom Umweltbundesamt auf eine feststehende horizontale Fläche an den angegebenen geografischen Koordinaten.

Die mittlere Bestrahlungsstärke aus Richtung der Sonne ergibt sich zu

$$E_{\text{mittel, senkrecht, UV-A}} = 214722.2222 \text{ Wh/m}^2 / 1826.1795 \text{ h} = 117.58 \text{ W/m}^2$$

$$E_{\text{mittel, senkrecht, UV-B}} = 8594.4444 \text{ Wh/m}^2 / 1826.1795 \text{ h} = 4.71 \text{ W/m}^2$$

Betrachtet man diese Werte als typisch für Wetterverhältnisse in Zentral-Deutschland, kann die eingestrahelte Energie auf eine horizontale feststehende Fläche für andere geografische Koordinaten berechnet werden. Für Essen mit $\lambda = 7.01^\circ$ Ost und $\phi = 51.46^\circ$ Nord folgt mit

$$\int_0^{365 \cdot 24} \cos(e) dt = 1785.1303 \text{ h}$$

Numerische Integration nach SIMPSON

```

-----
untere Intervallgrenze:? 0
obere Intervallgrenze:? 8760
Mantissenstellen      :? 7
min. Intervallzahl    :? 7

```

Integral	Fehler	Intervalle
1505.382451797996	.1606679505379586	3
1267.560831597742	1.250809766662818D-02	7
1880.016801543178	2.171810271208615D-02	15
1844.556857734418	1.281606605947019D-03	31
1763.10305639757	3.079941018054739D-03	63
1781.440868940461	6.86253951791188D-04	127
1780.073416183928	5.121334674925699D-05	255
1780.194620648419	4.538996769789673D-06	511
1786.897605457372	2.500790490542925D-04	1023
1785.044448067778	6.921050403345736D-05	2047
1785.170746591399	4.716580523634172D-06	4095
1785.124234651558	1.737019715044847D-06	8191
1785.131740218028	2.80299255628075D-07	16383
1785.130651243204	4.06683519544862D-08	32767

Das Integral hat den Wert 1785.130651243204

Berechnung des Integrals für Essen

$$W_{UV-A} = 117.58 \text{ W/m}^2 / 365 / 24 \text{ h} * 1785.1303 \text{ h} = 23.96 \text{ W/m}^2$$

$$W_{UV-B} = 4.71 \text{ W/m}^2 / 365 / 24 \text{ h} * 1785.1303 \text{ h} = 0.96 \text{ W / m}^2$$

Innerhalb Deutschlands ist davon auszugehen, daß die Abweichungen von diesen Werten in Folge von Änderungen des Wetters wesentlich größer sind als durch geografische Verschiebung des betrachteten Ortes.

Im Rahmen der Materialprüfung auf UV-Verträglichkeit sollen diese Bestrahlungsstärken reproduzierbar verstärkt durch eine technische Strahlenquelle erzeugt werden.

UV-Bestrahlungsgerät für Materialien

Benutzt man eine Kombination aus Strahler, Reflektor und Spektralfilter, kann in der Nähe des Brennpunktes UV-Strahlung hoher Strahlungsleistungsdichte erzeugt werden. Bild 2 zeigt eine prinzipielle Anordnung.

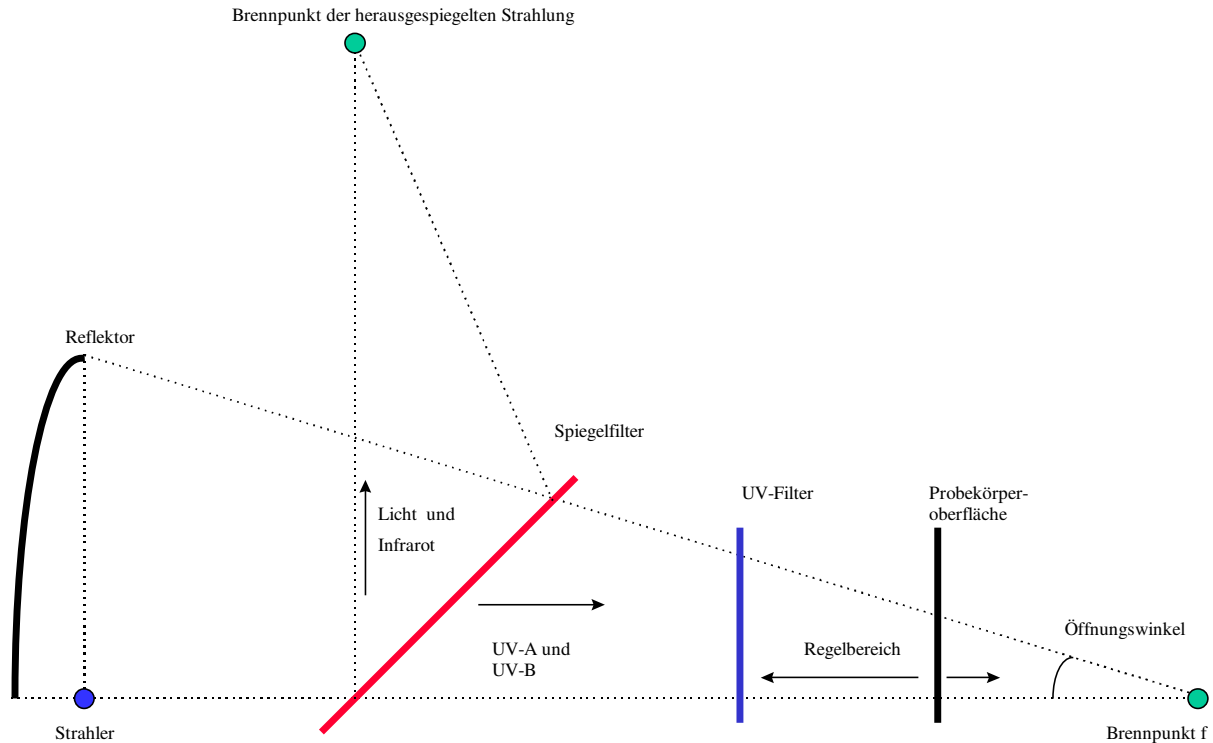


Bild 2 - prinzipieller Aufbau (nur oberer Strahlengang)

Bei dem Reflektor handelt es sich um einen elliptischen Paraboloiden dessen lineare Exzentrizität dem halben Durchmesser entspricht.

Der Halogen Metalldampfstrahler Ultramed 2000/380V/S strahlt im UV-A-Bereich einen Fluß von 500 W und im UV-B-Bereich einen von 100 W in den umliegenden Raum ab. Die elektrische Leistungsaufnahme beträgt 2 kW. Die Differenzleistung von 1.4 kW fällt auf Spektrallinien im sichtbaren Bereich und Verlustwärme. Mit Hilfe eines Reflektors kann die Hälfte der abgestrahlten Leistung auf eine Fläche umgeleitet werden, die in etwa der Oberfläche der zu prüfenden Material-Probekörper entspricht.

Im Abstand r vom Strahler stellt sich durch direkte Bestrahlung eine Bestrahlungsstärke von

$$E = \Phi / (4 * \pi * r^2) \quad (7)$$

ein. Die Bestrahlungsstärke durch den im Reflektor gespiegelten Anteil, dem vom Strahler in die linke Raumhälfte Gestrahlten, berechnet sich im Öffnungswinkel mit

$$E = \Phi / 2 * q / A(r) \quad (8)$$

mit der bestrahlten Fläche

$$A = \pi * D^2 / 4$$

$$A = \pi * (2 * h)^2 / 4$$

$$A = \pi * (2 * r * \tan(\alpha))^2 / 4$$

vom Brennpunkt aus gemessen. Rechnet man r als Abstand von der Strahlungsquelle ist

$$A = \pi * [(f - r) * \tan(\alpha)]^2 \quad (9)$$

Die Gesamtbestrahlungsstärke im Abstand r vom Strahler ist dann

$$E(r) = \Phi / (2 * \pi) * \{ 1/(2*r^2) + q/[(f-r)*\tan(\alpha)]^2 \} \quad (10)$$

mit der Brennweite f
und dem Wirkungsgrad q des Reflektors.

Innerhalb des Öffnungswinkels des Reflektors berechnet sich der durch eine Fläche gehende Strahlungsfluß mit

$$\Phi = E * A$$

Das Spiegelfilter im Strahlengang hat die wichtige Aufgabe Leistungsanteile im Spektralbereich des Lichts und Infrarot hinauszuspiegeln und UV-Anteile passieren zu lassen.

Die Dämpfung des durchgelassenen UV-Anteils entspricht dem Transmissionskoeffizienten τ_s für diesen Wellenbereich unter Berücksichtigung des Einfallswinkels.

Um die spektrale Strahlungsenergie der Sonne im UV-Bereich zu simulieren, muß eine Filterscheibe zwischengeschaltet werden, die den UV-B-Bereich des Strahlers dämpft.

$$\dot{W}_{UV-A, Sonne} / \dot{W}_{UV-B, Sonne} = 23.96 \text{ W/m}^2 / 0.96 \text{ W/m}^2 \approx 25$$

$$\Phi_{UV-A, Strahler} / \Phi_{UV-B, Strahler} = 500 \text{ W} / 100 \text{ W} * F = 5 / 1 * F$$

Die Leistung im UV-B-Bereich des Strahlers muß also an geeigneter Stelle um den Faktor

$$1/F = 0.2$$

reduziert werden.

Bild 3 und 4 zeigt die Herstellerdaten des Spezialglases DESAG M-UG 6 / 3.06 mm. Die Zeichnungen zeigen den spektralen Transmissionsgrad im Bereich von 280 nm bis 1000 nm und 280 nm bis 500 nm.



Nur zur Information
nicht im Änderungsdienst

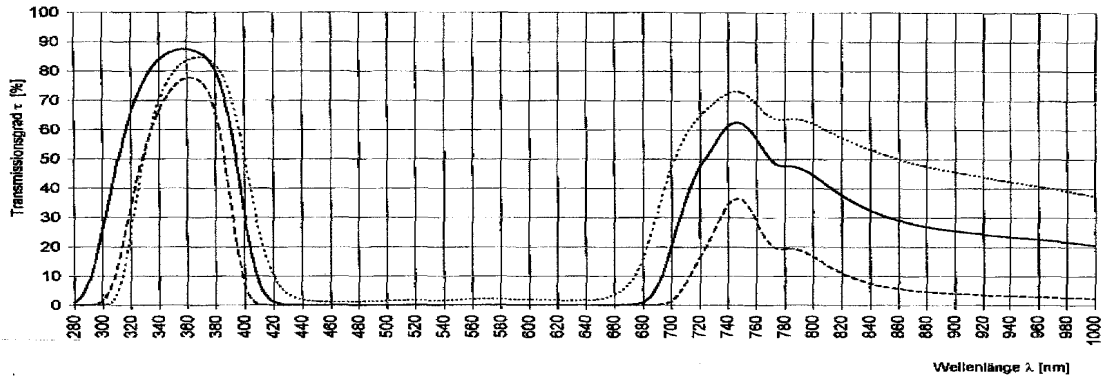
Spektraler Transmissionsgrad τ_λ

Proben:
 M-UG 6
 M-UG 2
 Uvisol 95*
 *therm. vorgesp.

Dicke in mm:
 x 3,08
 3,18
 3,25

Liniensart:
 ———
 - - - -
 ······

File (SSP):
 30000830
 30000831
 8/13214



86



Nur zur Information
nicht im Änderungsdienst

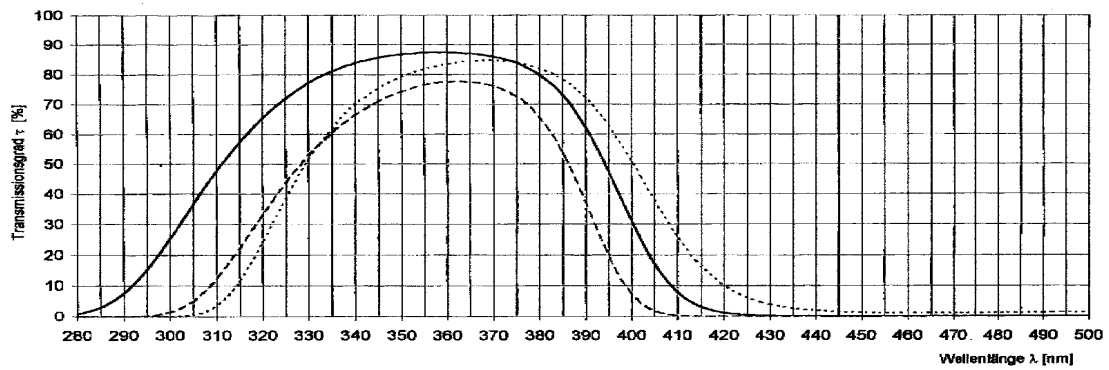
Spektraler Transmissionsgrad τ_λ

Proben:
 M-UG 6
 M-UG 2
 Uvisol 95

Dicke in mm:
 x 3,08
 3,18
 3,25

Liniensart:
 ———
 - - - -
 ······

File (SSP):
 30000830
 30000831



SOLMUG.xls / 14.01.98 / SQS-3 / Sehm

Ein Unternehmen
der Schott Gruppe

Bild 3 und 4 - Herstellerdaten des Filterglases

Der Verlauf des Transmissionsgrades kann im UV-Bereich mit der Funktion

$$f(\lambda) = \sin(\pi * (\lambda - 280 \text{ nm}) / (425 - 280) \text{ nm}) - 0.1 \quad (11)$$

approximiert werden.

Der mittlere Transmissionskoeffizient für einen Spektralbereich berechnet sich dann mit

$$\tau_{B,\text{mittel}} = 1 / (\lambda_2 - \lambda_1) * \int_{\lambda} \sin(\pi * (\lambda - 280 \text{ nm}) / (425 - 280) \text{ nm}) - 0.1 \, d\lambda \quad (12)$$

für $280 \text{ nm} \leq \lambda \leq 315 \text{ nm}$ ist

$$\tau_{\text{UV-B}} = 0.26$$

für $315 \text{ nm} \leq \lambda \leq 400 \text{ nm}$ ist

$$\tau_{\text{UV-A}} = 0.76$$

Berechnung des Strahlungsflusses auf der Probekörperoberfläche

Berechnungsgleichungen für den elliptischen Paraboloiden dessen lineare Exzentrizität dem halben Durchmesser entspricht:

$$e = f/2 = p$$

$$a_{1,2} = p * (1 \pm \sqrt{5}) / 2$$

$$b = (p * a)^{1/2}$$

$$F = a - e$$

Sinnvolle Werte für die geometrische Anordnung der Elemente sind:

Brennweite	f	= 0.68 m
Reflektor	D	= 0.68 m
Fokus	F	= 0.21 cm
Abstand Filter	r _{Filter}	= 0.50 m
Durchmesser Filterglas	D	= 180 mm
Durchmesser Probekörper	D _{probekörper}	= 4.00 cm
Wirkungsgrad Reflektor UV	q	= 0.5
Spiegelfiltertransmission	τ _s	= 0.9

Mit den angegebenen Werten ist die Bestrahlungsstärke des UV-Filters im Abstand r_{Filter} von dem Strahler mit Gleichung 10 und τ_s = 0.9

$$E_{\text{UV-A}} = 4564.2101 \text{ W / m}^2$$

$$E_{\text{UV-B}} = 912.8420 \text{ W / m}^2$$

Der Strahlungsfluß durch die Filterglasoberfläche ist mit D = 180 mm

$$\Phi_{\text{UV-A}} = 116.1450 \text{ W}$$

$$\Phi_{\text{UV-B}} = 23.2290 \text{ W}$$

Unter der Annahme, daß die Differenz zwischen eingestrahelter Energie und austretender Energie zu 100 % in Wärme umgesetzt wird, ergibt sich die Verlustleistung im Filter zu

$$\begin{aligned} P_V &= \Phi_{UV-A} * (1 - \tau_{UV-A}) + \Phi_{UV-B} * (1 - \tau_{UV-B}) \\ &= 116.145 \text{ W} * (1 - 0.76) + 23.229 \text{ W} * (1 - 0.26) \\ &= 45.0643 \text{ W} \end{aligned}$$

Die Bestrahlungsstärke und der Strahlenfluß durch die Probekörperoberfläche ist mit $r = 0.64 \text{ m}$, Gleichung 10, $\tau_s = 0.9$, $\tau_{UV-B} = 0.26$, $\tau_{UV-A} = 0.76$ und $D_{\text{probekörper}} = 4.00 \text{ cm}$

$$E_{UV-A} = 68105.18223 \text{ W} / \text{m}^2$$

$$E_{UV-B} = 4659.8283 \text{ W} / \text{m}^2$$

$$\Phi_{UV-A} = 85.5835 \text{ W}$$

$$\Phi_{UV-B} = 5.8557 \text{ W}$$

Die gesamte auf die Probekörperoberfläche eingestrahlte Leistung ergibt sich als Summe der Strahlungsflüsse. Wenn man annimmt, daß die Energie zu 100 % absorbiert wird ist dieser Wert entscheidend für die Erwärmung des Probekörpers.

$$\Phi_{\text{Summe}} = 91.4392 \text{ W}$$

Das Verhältnis der Bestrahlungszeiten zwischen natürlicher Bestrahlung durch die Sonne und dieser technischen Dauerbestrahlung ergibt sich als Verhältnis der Bestrahlungsstärken E . Die Summe der technischen Bestrahlungsstärken ist

$$E_{\text{tech}} = 72765.0105 \text{ W} / \text{m}^2$$

Die Summe der oben berechneten solaren Bestrahlungsstärken ist

$$\begin{aligned} E_{\text{sonne}} &= (23.96 + 0.96) \text{ W} / \text{m}^2 \\ &= 24.92 \text{ W} / \text{m}^2 \end{aligned}$$

Das Verhältnis der Bestrahlungsstärken ist

$$E_{\text{sonne}} / E_{\text{tech}} = 24.92 / 72765.0105 = 343.0220 * 10^{-6}$$

Wenn die dem Probekörper zugeführte Strahlungsenergie als Wärmeenergie abtransportiert werden kann, läßt sich eine 10jährige natürliche Bestrahlung experimentell durch eine Bestrahlungszeit von 30 Stunden simulieren.

$$t_{\text{Versuch}} = 343.0220 * 10^{-6} * t_{\text{Einbau}}$$

Die Bestrahlungsstärke der Versuchsanordnung ist einstellbar. Die Bestrahlungsstärke ist etwa reziprok quadratisch vom Abstand vom Brennpunkt abhängig. Beispielsweise ergibt sich bei wie oben gegebener Geometrie 1 cm unterhalb des UV-Filterglases eine Bestrahlungsstärke von

$$E_{\text{tech}} = 4136.3764 \text{ W} / \text{m}^2$$

was einer eingestrahelten Leistung von

$$\Phi = 5.1979 \text{ W}$$

auf die Probekörperfläche mit einem Durchmesser von 4 cm entspricht und zu Versuchszeiten von

$$t_{\text{Versuch}} = 6.0246 \cdot 10^{-3} \cdot t_{\text{Einbau}}$$

führt.

10 Jahre natürliche Bestrahlung entsprechen dann 527.8 Stunden technische Bestrahlung.

Eine weitere Möglichkeit die Bestrahlungsstärke einzustellen ist die Leistungsbegrenzung der Strahlungsquelle.

Die Möglichkeit hoher Bestrahlungsstärken bei Kühlung der Probekörperoberfläche durch z. B. kalte Gasgemische ist in anderen Fachbereichen zu diskutieren.

Bauteiltemperaturen und Wärmeleistungsbilanz

Strahlungsleistung auf Spiegelfilter

Die auf das Spiegelfilter treffende Strahlungsleistung beträgt

$$P = P/2 + \phi / (4\pi r^2) * A$$

Beim Prototypen des Gerätes ergab sich ein Abstand von etwa $r = 0,347$ m bei einer bestrahlten Fläche von $A = 0,3056$ m² und somit eine auf das Spiegelfilter auffallende Strahlungsleistung von 1404 W bei etwa 2 kW Leistung des Strahlers.

Nach Herstellerangaben beträgt der Transmissionskoeffizient im sichtbaren Bereich des Spektrums und im Infrarotbereich 0.93, woraus sich unter der Annahme keiner Reflektion ein Absorptionskoeffizient von 0,07 ergibt. Die absorbierte Strahlung wird als Wärme emittiert. Die sich einstellende Temperatur des Spiegelfiltermaterials ergibt sich unter der Annahme, daß keine Konvektionskühlung vorhanden ist aus

$$P = \epsilon * \sigma * A * (T_G^4 + T_U^4)$$

mit dem Absorptionskoeffizienten ϵ

der Proportionalitätskonstanten $\sigma = 5,670 * 10^{-8}$ W/(m² K⁴)

der Fläche $A = 0,3056$ m²

der Gerätetemperatur T_G

und der Umgebungstemperatur $T_U = 333$ K

zu etwa 280°C.

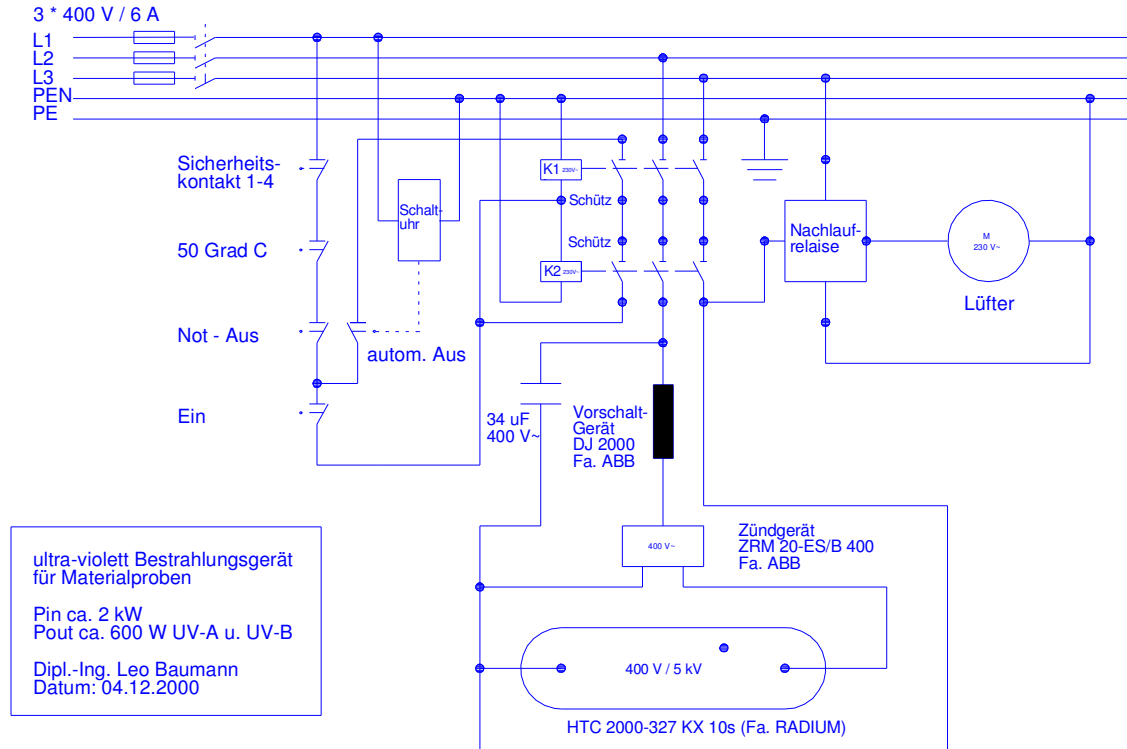
Strahlungsleistung auf Spektralfilter

Mit einer Fläche von $25,447 * 10^{-3}$ m², einer einfallenden Strahlung von ca. 45,1 W und einem Absorptionskoeffizienten im IR-Bereich von 0.65 stellt sich nach der gleichen Rechnung eine Gerätetemperatur von etwa 162° C ein, wenn keine Konvektionskühlung mitwirkt.

Damit ergibt sich folgende Wärmeleistungsbilanz:

Gesamtverlustleitung	2000 W
- UV-Nutzanteil	300 W
+ Wärme Spektralfilter	46 W
=	1746 W
- ca.700 W im Strahlenkegel	700 W -98 W = 602 W Aggregat
=	1046 W
+ Wärme Spiegelfilter	98 W
= Wärme im Gehäuse	1144 W
- Lüfterleistung für 60° C	1400 W
= Reserve Lüfterleistung	256 W = ca. 18.3 %

Schaltplan bei Betrieb an 400 V / 50 Hz



Belegung der Schaltklemmen

1	L1	Zuleitung
2	L2	Zuleitung
3	L3	Zuleitung
4	PEN	Zuleitung
5	PE	Zuleitung
6	S1	Gasentladungslampe
7	S2	Gasentladungslampe
8	PE	Erdung Reflektor
9	TK1	Türkontakt 1+2
10	TK1r	Türkontakt 1+2
11	TK2	Türkontakt 3+4
12	TK2r	Türkontakt 3+4
13	TS1	Übertemperaturschalter
14	TS2	Übertemperaturschalter
15	PE	Schutzerdung Temperaturschalterblech
16	L1	Lüfter
17	PEN	Lüfter
18	PE	Lüfter
19	PE	Schaltkasten
20	PE	Zündgerät

Bedienung und Sicherheitsvorkehrungen

In das UV-Bestrahlungsgerät für Materialien kann durch die Tür auf der Vorderseite eine Materialprobe eingebracht werden. Die Ablagefläche für die Materialprobe läßt sich in der Höhe so einstellen, daß entsprechend der Skala im Bestrahlungsraum die Bestrahlungsstärke eingestellt wird. Der Anschluß an das Stromnetz erfolgt über einen 16 A CEE Stecker.

Die Bestrahlungszeit läßt sich am Zeitrelais digital in Stunden und 1/10 Stunden einstellen und beginnt mit Einschaltung des Hauptschalters, wenn der Not-Aus-Schalter nicht verriegelt.

Für den Fall unvorhergesehener Vorkommnisse im Bestrahlungsraum, wie zum Beispiel Überhitzung der Materialprobe durch die Bestrahlung, läßt sich das Gerät sofort durch Druck auf den Not-Aus-Schalter abschalten.

Wird die Tür zum Bestrahlungsraum während des Betriebes geöffnet, wird über den Sicherheitskontakt das Gerät sofort ausgeschaltet. Der Bestrahlungsraum ist sofort frei von UV-Strahlung.

Wird während des Betriebes die Frontplatte zur Optik entfernt, wird das Gerät auf gleiche Art abgeschaltet.

Die Warnschilder an den entsprechenden Gehäuseplatten sind zu beachten und die Sicherheitskontakte dürfen nicht zu Reparatur- oder Reinigungszwecken überbrückt werden.

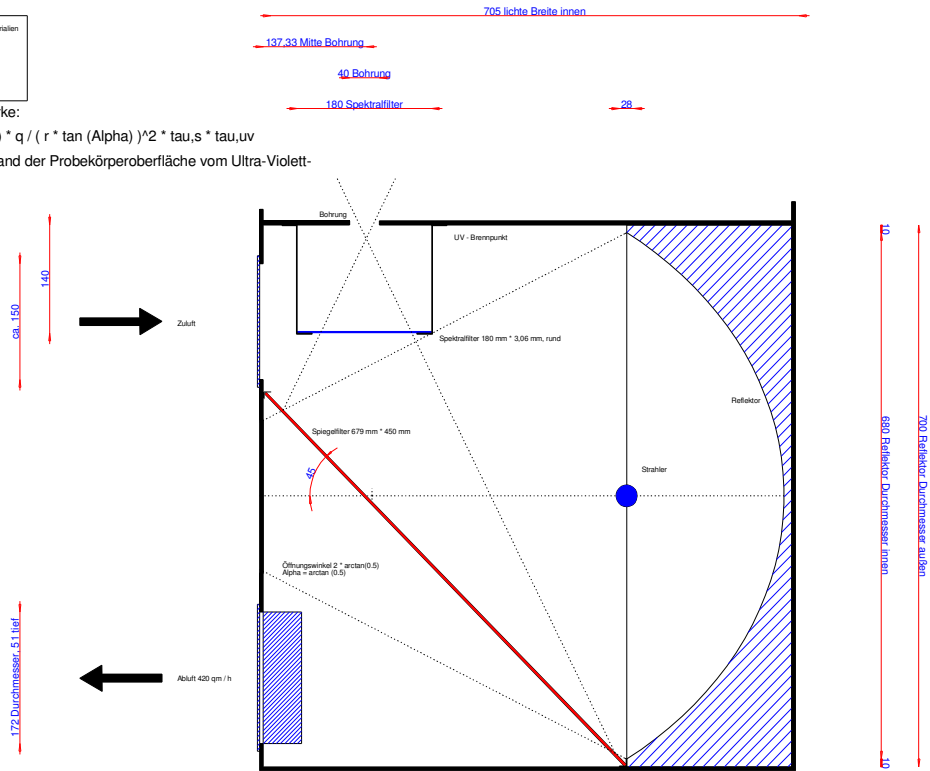
Geometrie der Anordnung

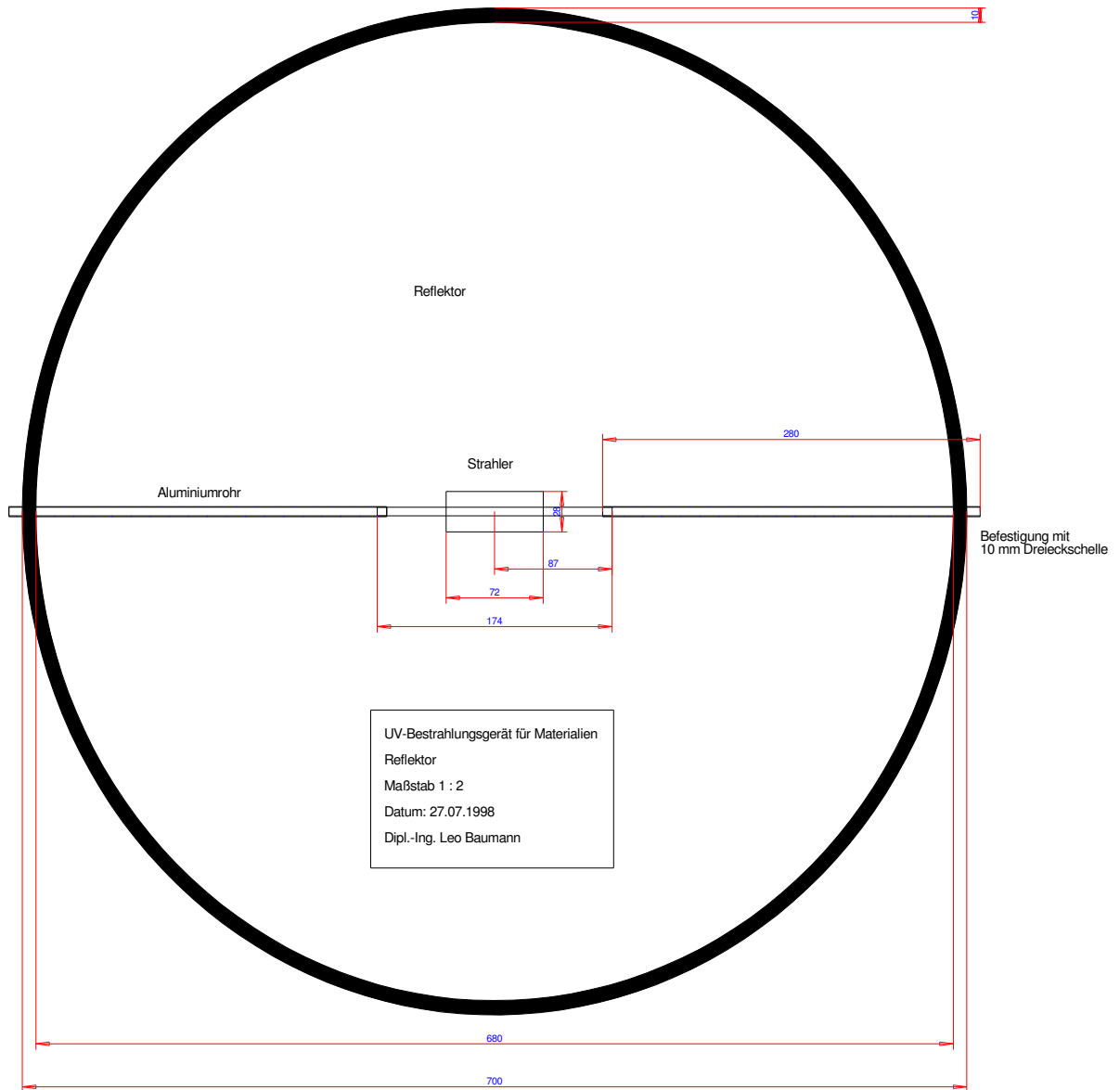
UV Bestrahlungsgerät für Materialien
 Geometrie der Anordnung
 Maßstab 1:2
 Datum: 23.07.1998
 Dipl.-Ing. Leo Baumann

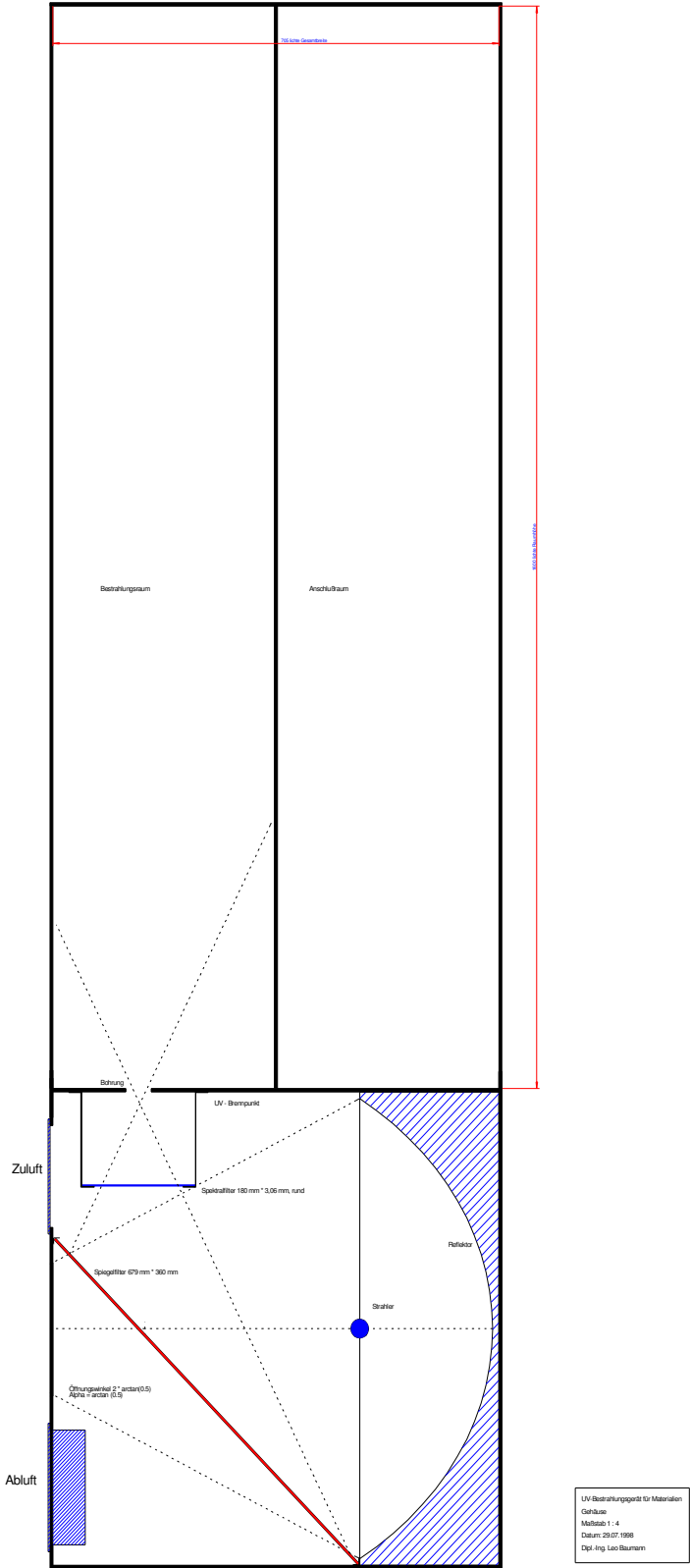
Bestrahlungsstärke:

$$E(r) = \Phi / (2 \cdot \pi) \cdot q / (r \cdot \tan(\alpha))^2 \cdot \tau_{uv}$$

wobei r der Abstand der Probekörperoberfläche vom Ultra-Violett-Brennpunkt ist







Messungen am Prototypen

Die erste Inbetriebnahme erfolgte unter der Voraussetzung, daß der Strahler nicht im Brennpunkt des Reflektors positioniert war. Die Bestrahlungsstärken lagen zwischen 3.19 W/m^2 bei 1429 mm und 64.2 W/m^2 bei 253 mm im UV-A-Bereich und zwischen 136 mW/m^2 bei 1424 mm und 2.1 W/m^2 bei 285 mm. Die sich einstellenden Interferenzen sind wellenlängenabhängig. Die grafische Darstellung ergibt für jeden Spektralbereich in dem gemessen wurde einen anderen Funktionsgrafen. Die Maxima der Funktionsgrafen sind ein Maß für die Eigenschaften des Reflektors in dem entsprechenden Spektralbereich. Sind hier die Maxima betragsmäßig gleich, arbeitet der Reflektor in beiden Spektralbereichen gleich gut. Die Messung hat identische Reflektionseigenschaften für die Bereiche UV-A und UV-B bestätigt. Weil die genaue Abweichung des Strahlers aus dem Brennpunkt nicht bekannt war, sind die Messwerte quantitativ unbedeutend.

Werden die Distanzen von der äußeren Oberkante des Gerätes bis zur bestrahlten Fläche des Probekörpers berechnet, und befindet sich der UV-Brennpunkt in Höhe der Unterseite des unteren Blechs zum Geräteraum, berechnet sich der Abstand vom Brennpunkt wie folgt.

$$r = h - (d - b_1) + b_2$$

mit r , dem Abstand vom Brennpunkt,
 h , dem Innenmaß des Bestrahlungsraums (hier 1675 mm),
 d , der gemessenen Höhe von der Oberkante,
 b_1 , der Blechstärke des oberen Blechs (hier 2 mm),
 b_2 , der Blechstärke des unteren Blechs (hier 2mm).

Eine weitere Messung wurde vorgenommen unter der Voraussetzung, daß der Strahler möglichst exakt im Brennpunkt positioniert ist. Unter Berücksichtigung des cos-förmigen Richtungsverhalten der UV-Messfühler und einem Neigungswinkel der Probekörperoberfläche von 5 Grad ergaben sich folgende Werte.

$E_{\text{UV-A}} / [\text{W/m}^2]$	$r / [\text{mm}]$
23.005	1465
26.257	1359
28.456	1288
31.815	1164
39.768	1013
51.418	876
65.687	694
148.053	430
421.976	251

$E_{UV-B} / [W/m^2]$	$r / [mm]$
0.8419	1469
1.0434	1359
1.0975	1281
1.1535	1171
1.4619	1017
1.9642	882
2.5856	698
5.4876	437
15.0954	247

Die Addition der Bestrahlungsstärken in den Bereichen UV-A und UV-B ergibt die praktisch vorhandenen Bestrahlungsstärken. Die kleinen Abweichungen beim Messen der Abstände können gemittelt werden.

Doppelt logarithmisch aufgetragen ergibt sich annähernd eine Gerade. Die Ausgleichsgerade ließ sich beim Prototypen durch folgende Parameter beschreiben:

$$m = -1.606154729$$

$$b = +6.450094441$$

Ein Vergleich mit der theoretisch erwarteten Bestrahlungsstärke ergibt einen Fehler der durch einen konstanten Faktor gegeben ist, dessen Betrag durch den mechanischen Aufbau sowie die genaue Leistung des Strahlers gegeben ist.

- `Reset:Digits:=16:`

praktisch aufgenommenen Messwerte und die zugehörigen Abstände vom Brennpunkt

- `UV_A:=[23.005, 26.257, 28.456, 31.815, 39.768, 51.418, 65.687, 148.053, 421.976]:`
- `UV_B:=[0.8419, 1.0434, 1.0975, 1.1535, 1.4619, 1.9642, 2.5856, 5.4876, 15.0954]:`
- `r_A:=[1465, 1359, 1288, 1164, 1013, 876, 694, 430, 251]:`
- `r_B:=[1469, 1359, 1281, 1171, 1017, 882, 698, 437, 247]:`
- `m:=nops(UV_A):`

Addition der Bestrahlungsstärken in den Bereichen UV-A u. UV-B und Mittelung der Abstände

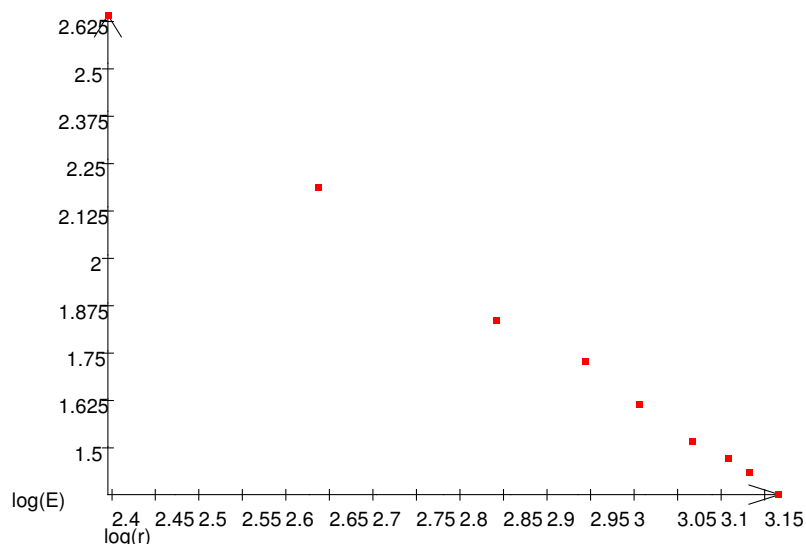
- `UV_G:=[UV_A[n] + UV_B[n] $ n=1..m]:`
- `r_m:=[float(r_A[n]+(r_B[n] - r_A[n])/2) $ n=1..m]:`

Logarithmierung von UV_G und r_m

- `UV_L:=[float(ln(UV_G[n])/ln(10)) $ n=1..m]:`
- `r_L:=[float(ln(r_m[n])/ln(10)) $ n=1..m]:`

Darstellung der log. Gesamtbestrahlungsstärke über dem Brennpunktabstand

- `plot2d(BackGround = [1,1,1], ForeGround = [0,0,0], Scaling = UnConstrained, Arrows = TRUE, AxesScaling = [Lin,Lin], PointWidth = 25, Labeling = TRUE, Labels = ["log(r)", "log(E)"], [Mode = List, [point(r_L[n], UV_L[n]) $ n=1..m], Color = [Flat, [1,0,0]]]);`



Berechnung der Ausgleichgeraden für die doppelt Logarithmierten Messwerte

- `sxy:=_plus(UV_L[i]*r_L[i] $ i=1..m):sy:=_plus(UV_L[i] $ i=1..m):sx:=_plus(r_L[i] $ i=1..m):`
`sxq:=_plus(r_L[i]^2 $ i=1..m):sqx:=sx^2:a1:=(m*sxy - sy*sx)/(m*sxq-`
`sqx);a0:=(sy*sxq - sx*sxy)/(m*sxq-sqx);`

-1.606154729

6.450094441

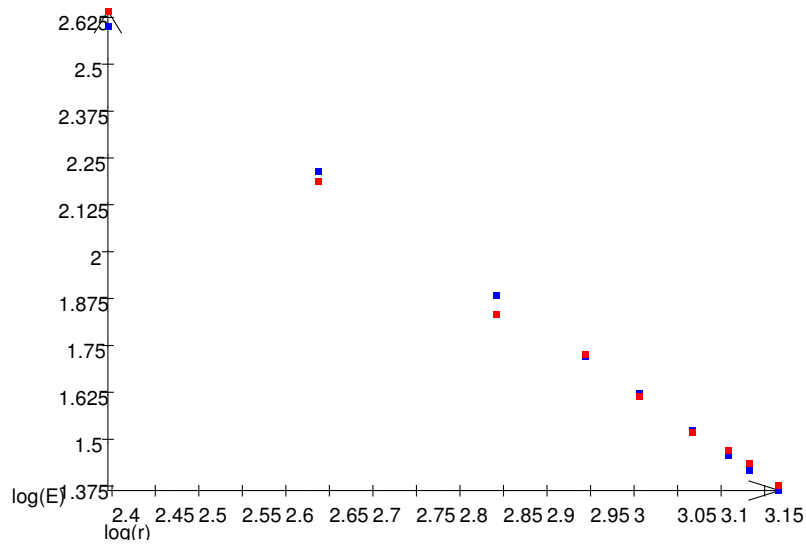
- `UV_LG:=[a1*r_L[n]+a0 $ n=1..m]:`

Darstellung der log. Gesamtbestrahlungsstärke über dem Brennpunktastand (rot) und die korrespondierenden Punkte aus der Ausgleichsgeraden (blau)

- ```

plot2d(BackGround = [1,1,1], ForeGround = [0,0,0], Scaling = UnConstrained,
Arrows = TRUE,
AxesScaling = [Lin,Lin], PointWidth = 25, Labeling = TRUE, Labels =
["log(r)", "log(E)"],
 [Mode = List, [point(r_L[n], UV_L[n]) $ n=1..m], Color = [Flat,
 [1,0,0]]],
 [Mode = List, [point(r_L[n], UV_LG[n]) $ n=1..m], Color =
 [Flat, [0,0,1]]]);

```



•

Gemessene Bestrahlungsstärken 280-400 nm Prototyp

| Bestrahlungsstärke     | Distanz<br>Brenn-<br>punkt | Faktor<br>mittl.<br>Sonne<br>Mainfl.<br>Offen-<br>bach | Faktor<br>senkr.<br>Sonne<br>Mainfl.<br>Offen-<br>bach |
|------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| E/ [W/m <sup>2</sup> ] | r/ [mm]                    | x-fach                                                 | x-fach                                                 |
| 70000                  | 10,00                      | 2745,80                                                | 572,00                                                 |
| 60000                  | 11,00                      | 2353,50                                                | 490,00                                                 |
| 50000                  | 12,00                      | 1961,00                                                | 408,00                                                 |
| 40000                  | 14,00                      | 1570,00                                                | 327,00                                                 |
| 30000                  | 17,00                      | 1177,00                                                | 245,00                                                 |
| 20000                  | 22,00                      | 785,00                                                 | 164,00                                                 |
| 15000                  | 26,00                      | 590,00                                                 | 123,00                                                 |
| 10000                  | 33,50                      | 392,00                                                 | 82,00                                                  |
| 9000                   | 36,00                      | 353,00                                                 | 74,00                                                  |
| 8000                   | 38,50                      | 313,80                                                 | 65,00                                                  |
| 7000                   | 42,00                      | 275,00                                                 | 57,00                                                  |
| 6000                   | 46,00                      | 236,00                                                 | 50,00                                                  |
| 5000                   | 51,60                      | 196,00                                                 | 40,00                                                  |
| 4000                   | 59,30                      | 156,90                                                 | 32,00                                                  |
| 3000                   | 71,00                      | 117,70                                                 | 24,00                                                  |
| 2000                   | 91,30                      | 78,50                                                  | 16,40                                                  |
| 1000                   | 140,60                     | 39,20                                                  | 8,20                                                   |
| 500                    | 216,50                     | 19,60                                                  | 4,10                                                   |
| 400                    | 248,00                     | 15,70                                                  | 3,30                                                   |
| 300                    | 297,60                     | 11,80                                                  | 2,45                                                   |
| 200                    | 383,00                     | 7,80                                                   | 1,64                                                   |
| 100                    | 589,70                     | 3,90                                                   | 0,82                                                   |
| 50                     | 908,00                     | 1,96                                                   | 0,41                                                   |
| 40                     | 1043,30                    | 1,60                                                   | 0,32                                                   |
| 30                     | 1248,00                    | 1,20                                                   | 0,24                                                   |

Fehlerquellen: Änderung der mittleren Wetterverhältnisse  
Alterung technischer Strahler  
Leistungsstreuung technischer Strahler  
Temperaturabhängigkeit der Foto-Oxidation  
Abstand technischer Strahler, Materialoberfläche  
chemische Reaktionsgeschwindigkeiten

### **Literaturverzeichnis:**

- [1] Funkortung und Navigation, Vorlesung FH-Niederrhein,  
Prof. Dr.-Ing. Brocks
- [2] Taschenbuch Elektrotechnik, Carl Hanser-Verlag München Wien  
Herausgegeben von Eugen Philippow
- [3] Monatsberichte aus dem Meßnetz, Umweltbundesamt
- [4] Bartsch, Taschenbuch der Mathematik

### **Anlagen**

- [1] Monatsberichte aus dem UV-Messnetz des Umweltbundesamtes
- [2] Schaltplan und Liste der elektrischen Bauteile
- [3] Bedienung und Sicherheitsvorkehrungen
- [4] Geometrie der Anordnung im Maßstab 1 : 6.07
- [5] Auswertung der Messungen