

## An Objective Calibration of the Scale of Sunspot-Numbers

by

M. WALDMEIER

The Zürich sunspot-relative-numbers, known for more than 200 years, are the solar index most frequently used in the study of solar activity variations and in solar terrestrial research. From the definition of the sunspot-relative-numbers it follows that this index is subject to a more or less degree to the quality of seeing and the personal method of counting spots. Therefore the observations have to be reduced to the common standard scale by applying an individual reduction factor. The Zürich standard scale has never been calibrated in an objective way. Nevertheless there are no indications of a change of that scale. There is a close correlation between the daily values of the sunspot-numbers  $R$  and the solar-radio-emission  $F$  at 10.7 cm wavelength. This correlation is even closer for the monthly and yearly means. As the intensity of the radio-emission can be measured in an objective way, it may yield a possibility to calibrate the scale of the sunspot-relative-numbers. The  $R$ - $F$ -relation deduced from observations in the years 1947 through 1970 is given in figure 2 and table 4. For values  $R \geq 30$  this relation reads as follows:  $F = 55.0 + 0.931 \cdot R$ . For values  $R < 30$  there is a deviation from the linear relationship in such a way that the  $F$ -values are larger than that given by the formula, reaching  $F = 68$  for  $R = 0$ . As long as this relation holds, the Zürich series of sunspot-numbers may be considered to be homogeneous. If this relation should be subject to changes in the time to come, then the reduction factor used hitherto ought to be changed in such a way that the old  $R$ - $F$ -relation is reestablished.

Bei Untersuchungen sowohl über die zeitliche Variation der Sonnenaktivität als auch über die solar-terrestrischen Beziehungen sind die «Sonnenfleckenzahlen» der Eidgenössischen Sternwarte Zürich der am häufigsten verwendete solare Index. Der wichtigste Grund dafür liegt darin, daß dieser Index für ein weit längeres Intervall zur Verfügung steht als irgendein anderer. Die Relativzahlen sind seit 1818 — von wenigen Lücken abgesehen — für jeden Tag bekannt. Monatliche Mittelwerte der Relativzahlen liegen ab 1749 vor, jährliche Mittelwerte ab 1700, und die Jahre der Sonnenfleckenzahlenminima und -maxima sind seit der Entdeckung der Sonnenflecken (1610) bekannt [1].

Tabelle 1 Die monatlichen Mittelwerte der Sonnenfleckenrelativzahlen R

Jahr	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1947	116	133	130	150	201	164	158	189	169	164	128	116
1948	108	86	95	190	174	163	142	158	143	136	96	138
1949	119	182	158	147	106	122	126	124	145	132	144	118
1950	102	95	110	113	106	84	91	85	51	61	55	54
1951	60	60	56	93	108	101	62	61	83	52	52	45
1952	41	23	22	29	23	36	39	55	28	24	22	34
1953	26	4	10	28	12	22	9	24	19	8	2	2
1954	0	0	11	2	1	0	5	8	2	7	9	8
1955	23	21	5	11	29	32	27	41	43	58	89	77
1956	74	124	118	111	137	117	129	170	173	155	201	192
1957	165	130	157	175	165	201	187	158	236	254	211	239
1958	202	165	191	196	175	172	191	200	201	182	152	188
1959	217	143	186	163	172	169	150	200	145	111	124	125
1960	146	106	102	122	120	110	122	134	127	83	90	86
1961	58	46	53	61	51	77	70	56	64	38	33	40
1962	39	50	46	46	44	42	22	22	51	40	27	23
1963	20	24	17	29	43	36	20	33	39	35	23	15
1964	15	18	16	9	10	9	3	9	5	6	7	15
1965	18	14	12	7	24	16	12	9	17	20	16	17
1966	28	24	25	49	45	48	57	51	50	57	57	70
1967	111	94	112	70	86	67	92	107	77	88	94	126
1968	122	112	92	81	127	110	96	109	117	108	86	110
1969	104	120	136	107	120	106	97	98	91	96	94	98
1970	112	128	103	110	128	107	112	93	100	87	95	83

Tabelle 2 Die monatlichen Mittelwerte der solaren Radioemission F auf der Wellenlänge 10.7 cm

Jahr	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1947	—	—	—	—	—	—	215	231	199	208	178	174
1948	153	133	135	208	226	196	183	173	163	158	163	190
1949	181	218	203	182	155	158	160	175	172	177	178	162
1950	149	142	137	164	157	129	134	121	98	99	101	99
1951	106	101	102	127	168	162	116	110	118	105	103	101
1952	94	86	78	84	81	85	89	93	81	82	82	84
1953	82	72	70	81	72	73	70	75	74	72	70	70
1954	68	69	72	69	68	67	68	70	70	73	72	74
1955	88	85	76	78	83	89	87	91	95	111	129	132
1956	139	166	160	165	163	154	163	194	200	200	247	249
1957	228	185	197	200	208	252	218	202	266	281	256	282
1958	248	210	250	246	219	220	224	237	243	226	207	234
1959	271	206	228	210	213	217	203	234	194	164	183	179
1960	200	169	146	167	163	162	164	174	164	141	147	136
1961	120	105	104	105	99	110	116	106	112	96	89	93
1962	93	101	100	96	98	91	81	77	89	87	84	81
1963	78	79	78	79	88	83	76	81	85	84	81	77
1964	72	74	75	73	71	71	69	71	71	72	71	75
1965	75	73	73	72	80	79	77	77	77	79	75	74
1966	85	82	89	98	101	99	110	109	112	108	111	121
1967	143	143	159	131	147	124	145	158	134	135	142	158
1968	183	169	141	130	158	147	142	146	142	151	136	144
1969	148	152	171	156	149	167	141	147	139	153	153	139
1970	153	171	157	163	172	160	157	142	145	147	158	148

Für alle Untersuchungen, bei denen die Relativzahlen verwendet werden, ist die Konstanz des Skalenwertes entscheidend. Es muß verlangt werden, daß gleichen Werten der Relativzahl selbst über Jahrzehnte oder Jahrhunderte stets derselbe Grad der Sonnenaktivität entspricht. Eine direkte Prüfung der Konstanz des Skalenwertes ist bei den neueren Beobachtungen schwierig, bei den weit zurückliegenden überhaupt unmöglich. Alle indirekten Indizien aber sprechen für die Konstanz der Skala der Relativzahlen über die letzten zwei Jahrhunderte. Es liegen keine Anhaltspunkte vor, daß sich der Skalenfaktor in dieser Zeit merkbar oder systematisch verändert hat [2]. Dies ist in Anbetracht der Definition und der Art der Bestimmung der Relativzahlen erstaunlich.

Die von R. Wolf eingeführte Relativzahl  $R$  wird nach folgender Vorschrift bestimmt:

$$R = k(10g + f) \quad (1)$$

Dabei bedeutet  $g$  die Anzahl der Fleckengruppen,  $f$  die Gesamtzahl der in allen Gruppen zusammen vorhandenen Flecken und  $k$  den Faktor zur Reduktion auf die von Wolf benutzte Skala. Auf den ersten Blick mag es scheinen,  $g$  und  $f$  seien durch Abzählung eindeutig bestimmbar, und es bedürfe deshalb gar keines Reduktionsfaktors.

Was die Bestimmung von  $g$  anbetrifft, können die von verschiedenen Beobachtern erhaltenen Werte voneinander abweichen, indem kleine Flecken bei schlechter Bildqualität oder bei zu schwacher Vergrößerung übersehen werden oder die nicht immer eindeutige Unterteilung in Gruppen verschieden vorgenommen wird. Bei der Bestimmung von  $f$  fallen die Bildqualität und die persönliche Art der Zählung (Abgrenzung zwischen Poren und Flecken, Trennung von sich berührenden Flecken, Gewichte großer Einzelflecken, dunkle Stellen in der Penumbra usw.) noch stärker ins Gewicht. Aus diesen Gründen werden verschiedene Beobachter, selbst wenn sie gleichzeitig und mit demselben Instrument beobachten, verschiedene  $g$ - und  $f$ -Werte erhalten. Mit dem Faktor  $k$  werden die beobachteten Werte auf die Wolfsche Skala reduziert. Es versteht sich, daß eine solche Reduktion nur möglich ist, wenn die  $g$ - und  $f$ -Werte der einzelnen Beobachter nicht stark voneinander abweichen. Bei einem strengeren Vorgehen müßten  $g$  und  $f$  separat mit verschiedenen Faktoren reduziert werden. Der Betrag von  $k$  schwankt von Tag zu Tag, so daß es nur sinnvoll ist, mit dessen Mittelwert zu operieren.

Auf diese Weise können die Werte des einen Beobachters auf die Skala eines andern oder auf die Standardskala reduziert werden. Wie aber ge-



winnt man die Standardskala? Diese Frage, d. h. die Frage nach der Konstanz des Skalenfaktors, bildet den Gegenstand dieser Mitteilung.

Die Standardrelativzahlen werden aus den vom Verfasser bestimmten g- und f-Werten unter Verwendung des Reduktionsfaktors  $k = 0.60$  berechnet. Dieser Faktor ergab sich aus Parallelbeobachtungen von R. Wolf und A. Wolfer in den Jahren 1882—1894; Zählart und Reduktionsfaktor sind seither beibehalten und von Generation zu Generation überliefert worden. Dies schließt allerdings nicht aus, daß die Zählart sich im Laufe der Zeit verändert haben könnte. Um auch in Zukunft die Konstanz des Skalenwertes sicherzustellen bzw. allfällige Veränderungen erkennen zu können, muß versucht werden, die innerhalb gewisser Grenzen subjektiven Relativzahlen an einer objektiven Messung zu eichen.

Die Intensität der solaren Radioemission unterliegt dem elfjährigen Zyklus. Eine sehr enge Korrelation zwischen den Sonnenfleckenzahlen und der Radioemission zeigt sich bei Wellenlängen um 10 cm;

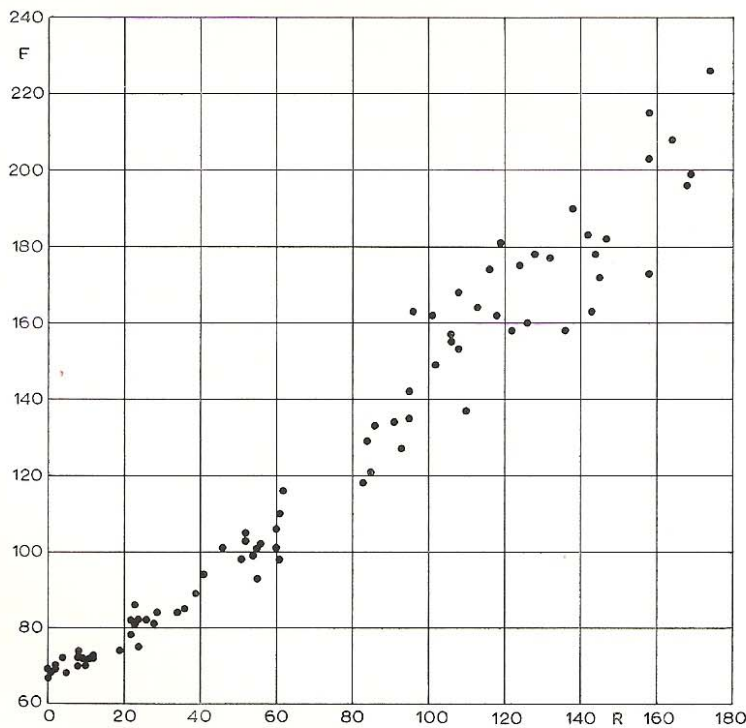


Abb. 1a Die Beziehung zwischen der Radioemission F und der Relativzahl R (Monatsmittel). 1947—1954.

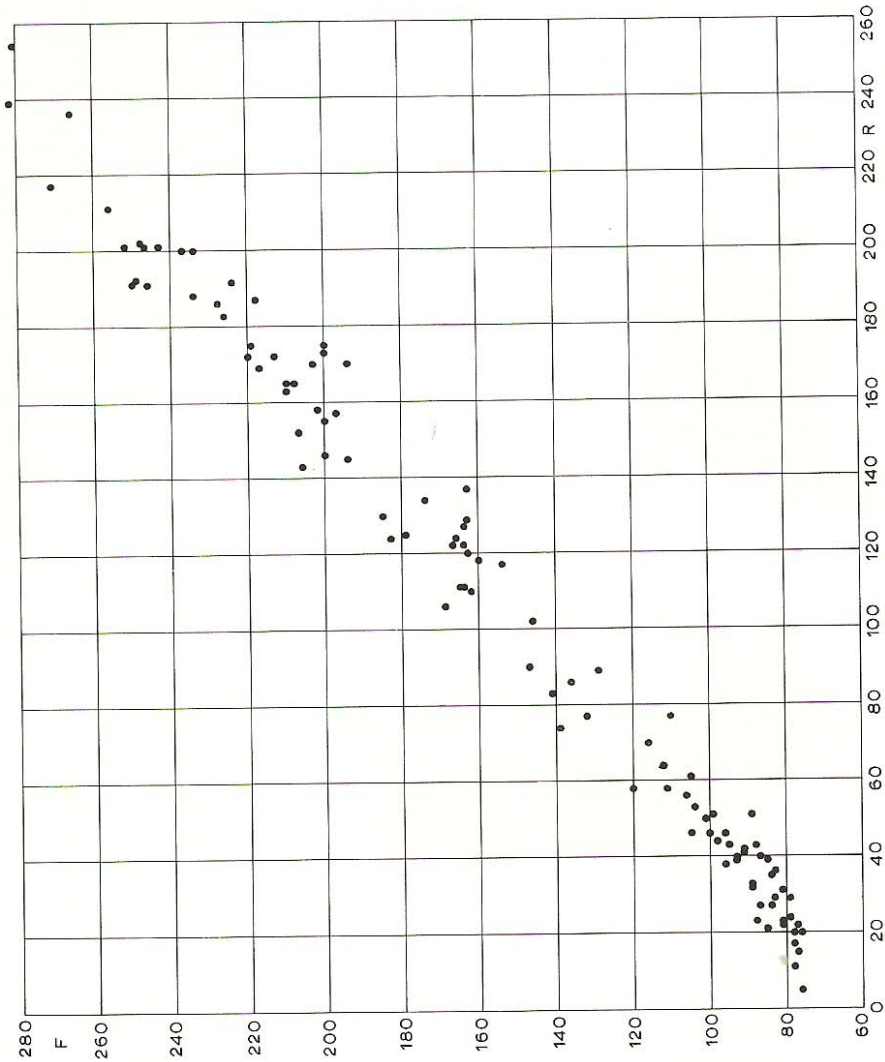


Abb. 1b Die Beziehung zwischen der Radioemission F und der Relativzahl R (Monatsmittel), 1955—1963.

sowohl nach längeren wie nach kürzeren Wellen nimmt die Korrelation stark ab. Deshalb werden die auf der Wellenlänge 10.7 cm gemessenen Intensitäten seit 1956 in der alljährlich erscheinenden «Sonnenaktivität» publiziert und die Tageswerte den entsprechenden Werten der Relativzahlen gegenübergestellt [3]. Diese Intensitätsmessungen sind 1947 von

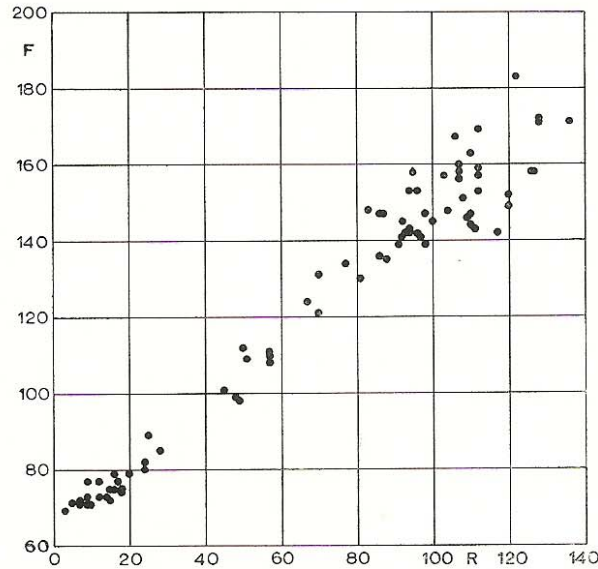


Abb. 1c Die Beziehung zwischen der Radioemission F und der Relativzahl R (Monatsmittel), 1964—1970.

A. E. Covington begonnen und vom National Research Council, Ottawa, bis auf den heutigen Tag weitergeführt worden. Da es sich bei diesen Intensitäten um eine Größe handelt, die objektiv meßbar und sehr eng mit der Relativzahl korreliert ist, könnte die Radioemission zur Festlegung des Skalenwertes der Relativzahlen dienen.

In Tabelle 1 sind die monatlichen Mittelwerte der Sonnenfleckenrelativzahlen (R) von 1947 bis 1970 mitgeteilt, in Tabelle 2 die entsprechenden Mittelwerte der Radiointensität (F). Die für diese verwendete Einheit beträgt  $10^{-22}$  W/m<sup>2</sup> bei 1 Hz Bandbreite.

Um zunächst zu prüfen, ob sich in den 24 Jahren, in welchen Parallelbeobachtungen vorliegen, die F-R-Relation verändert hat, ist in Abb. 1 das Material in drei etwa gleich lange Intervalle unterteilt worden: 1947 bis 1954, 1955 bis 1963, 1964 bis 1970. Der erste Abschnitt umfaßt somit den absteigenden Ast von Zyklus Nr. 18 (Maximum 1947, Minimum 1954), der zweite den ganzen Zyklus Nr. 19 (Minimum 1954 bis Minimum 1964) und der dritte den aufsteigenden Ast von Zyklus Nr. 20 (Minimum 1964, Maximum 1968/69). Legt man in den Abbildungen 1a bis 1c durch den Punktschwarm je eine ausgleichende Kurve, so fallen die drei erhaltenen Kurven weit innerhalb der Streubreite zusammen. Daraus ist zu schließen,

Tabelle 3 Die jährlichen Mittelwerte der Relativzahlen und der Radioemission

Jahr	R	F	Jahr	R	F
1947	154.0	201	1959	159.0	209
1948	136.3	173	1960	112.3	161
1949	134.7	177	1961	53.9	105
1950	83.9	127	1962	37.5	90
1951	69.4	118	1963	27.9	81
1952	31.5	85	1964	10.2	72
1953	13.9	73	1965	15.1	76
1954	4.4	70	1966	47.0	102
1955	38.0	95	1967	93.8	143
1956	141.7	184	1968	105.9	149
1957	190.2	232	1969	105.5	151
1958	184.8	231	1970	104.5	156

daß die F-R-Relation sich in dem betrachteten Intervall nicht verändert hat und auch nicht von der Phase des elfjährigen Zyklus abhängt. Es ist deshalb begründet, die gesuchte F-R-Relation unter Benützung des gesamten Materials abzuleiten.

Zu diesem Zweck verwenden wir anstelle der Monatsmittel die in Tabelle 3 mitgeteilten Jahresmittel. Dabei wird zwar die Zahl der korrespondierenden Wertepaare stark verringert, zugleich aber auch die Streuung. Da sich die Radiointensitäten 1947 nur auf die zweite Jahreshälfte beziehen, ist auch für die Relativzahlen nicht das Jahresmittel (151.6) eingetragen, sondern der Mittelwert aus den letzten 6 Monaten. Die Jahresmittel von F und R sind in Abb. 2 dargestellt.

Tabelle 4 Die Beziehung zwischen der Relativzahl R und der Radioemission F

R	F	R	F	R	F	R	F	R	F
0	68	50	102	100	148	150	195	200	241
5	70	55	106	105	153	155	199	205	246
10	72	60	111	110	157	160	204	210	250
15	74	65	116	115	162	165	209	215	255
20	77	70	120	120	167	170	213	220	260
25	80	75	125	125	171	175	218	225	264
30	83	80	130	130	176	180	223	230	269
35	88	85	134	135	181	185	227	235	274
40	92	90	139	140	185	190	232	240	278
45	97	95	143	145	190	195	237	245	283



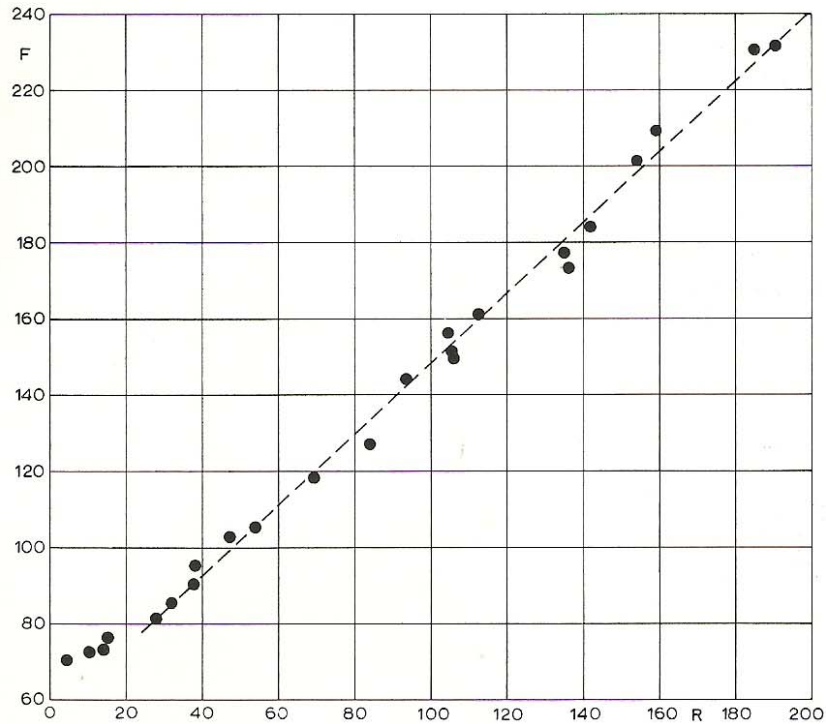


Abb. 2 Die Beziehung zwischen der Radioemission  $F$  und der Relativzahl  $R$  (Jahresmittel), 1947—1970.

Die Radioemission setzt sich zusammen aus dem Beitrag  $F_0$  der ungestörten Sonne und dem Beitrag  $F_1$  der koronalen Kondensationen.  $F_0$  ist von der Sonnenaktivität unabhängig,  $F_1$  ist zu ihr nahezu proportional. Es ist somit:

$$F = F_0 + F_1 = F_0 + \alpha R \quad (2)$$

Diese Beziehung gilt für  $R \geq 30$ , wobei die Ausgleichung liefert:  $F_0 = 55.0$ ,  $\alpha = 0.931$ . Die durch (2) gegebene Gerade ist in Abb. 2 eingezeichnet. Sie stellt die Beobachtungen bei  $R \geq 30$  gut dar, liefert jedoch bei  $R < 30$  zu kleine  $F$ -Werte. Bei kleiner Aktivität nimmt mit abnehmendem  $R$   $F$  langsamer ab als nach (2) und erreicht bei  $R = 0$  den extrapolierten Wert  $F = 68$ .

In Tabelle 4 sind nach (2) und Abb. 2 zusammengehörige Werte von  $R$  und  $F$  mitgeteilt. Solange diese  $R$ - $F$ -Beziehung auch in Zukunft gilt, ist der Skalenwert der Relativzahlen konstant. Sollten jedoch Abweichungen

von dieser R-F-Relation auftreten, die größer sind als die Streuung in Abb. 2, würde dies bedeuten, daß der Skalenwert der Relativzahlen sich geändert hat. Es müßte dann der Reduktionsfaktor  $k$  so abgeändert werden, daß die durch Tabelle 4 gegebene R-F-Beziehung wieder hergestellt wird. Dabei ist vorausgesetzt, daß der Skalenwert der F-Messungen seinerseits konstant bleibt. Ob die Absolutwerte richtig sind, spielt dabei keine Rolle. Tatsächlich dürften diese um einige Prozent verfälscht sein. Wichtig ist nur, daß die Apparatur und die Methode der Eichung und damit die verwendete Intensitätseinheit unverändert bleiben.

#### *Literatur*

- [1] WALDMEIER, M., The Sunspot-Activity in the Years 1610—1960, Zürich 1961.
- [2] NAGASAWA, S., T. SUZUKI and M. MIYASHITA, Tokyo Astron. Bulletin second series No. 199 (1970).
- [3] WALDMEIER, M., Astron. Mitt. Eidg. Sternwarte Zürich Nr. 208, 215, 221, 229, 237, 244, 251, 261, 267, 273, 279, 283, 288, 296, 303 (1957—1971).

Zürich, Juni 1971