

Das Weber-Fechner'sche Gesetz unter besonderer Berücksichtigung des Weber'schen Gesetzes

Konrad Hoppe (2012).

Dieser Aufsatz von Konrad Hoppe, dem langjährigen Mitglied des Philosophiekreises der Erlöserkirchgemeinde Potsdam, wird hier erstmals posthum veröffentlicht am **9. April 2012**, dem Tag seiner Beerdigung auf dem Bornstedter Friedhof, nachdem er am 29. Februar im Alter von 71 Jahren in Potsdam verstorben war und mir sein Sohn, Gero Hoppe, dieses, sein vermutlich letztes Manuskript, welches auf seinem Schreibtisch lag, übergeben hat.

Pfarrer Konrad Elmer-Herzig

Einleitung und Zielstellung:

Die klassische messtechnische Grundlage für den Zusammenhang zwischen Reiz (S)- und Empfindungsintensität (R) ist der paarweise Vergleich der Intensitäten mehrerer nur wenig verschiedener Reizgrößen gegen einen Basisreiz gleicher Qualität mit Hilfe der Urteilkategorien „gleich“ und „größer als“. Durchlaufen die Vergleichsreize in kleinen äquidistanten Schritten den Bereich von „gleich“ bis deutlich größer, so gibt der Übergang von „gleich“ zu „größer als“ das Schwellenkriterium für die Unterschiedsschwelle (U_S) an. Ernst Heinrich Weber (1795-1878) untersuchte für verschiedene Sinnesqualitäten, insbesondere aber die Schwereempfindung, die Abhängigkeit der Unterschiedsschwellen U_S vom Basisreiz S . Er fand, dass über weite Bereiche von S das Verhältnis U_S zu S , der Weber-Quotient k , konstant ist:

$$k = U_S/S . \quad (1)$$

Gustav Theodor Fechner (1801-1887) nannte diese Konstanz das Weber'sche Gesetz, und das experimentelle Verfahren die Methode der ebenmerklichen Unterschiede (Fechner, 1860). Dieses wurde später von Wilhelm Wundt (1832-1920) als Methode der Minimaländerungen bezeichnet. (Wundt, 1908). Auf die scheinbare Schwachstelle des Verfahrens, nämlich die Definition des Schwellenkriteriums, weist der Begriff jnd (just noticeable difference) für die Unterschiedsschwelle hin, der für die entsprechende „Method of Limits“ gebraucht wird (Guilford, 1954). Es gilt:

$$U_S = f(S) = kS \quad (1a)$$

die allgemeine Weber-Funktion $f(S)$ (Pfanzenagel, 1962), im Fall des Weber'schen Gesetzes (1) linear mit dem Anstieg k und dem absoluten Glied Null (1). Fechner erkannte bereits 1850, dass die Unterschiedsschwellen von der experimentellen Methode her bei einer konstanten und zugleich differentiellen Intensitätsdifferenz dR bestimmt werden. Um dieser Erkenntnis eine quantitative Begründung zu geben, führte er eine statistisch auswertbare

Erweiterung der experimentellen Basis ein. Bei einer angemessen großen Zahl von Durchläufen der Vergleichsreize, liegt der Kategorienübergang von „gleich“ nach „größer als“ als Schwellenkriterium bei einer relativen Häufigkeit von 50 %, ohne Gleichurteil bei 75 %. Es gilt als Messmodell die Grundfunktion

$$p = f(S_r - S) \quad (2).$$

Dabei ist p die Urteilswahrscheinlichkeit als Funktion der Reizdifferenzen. Fechner nennt das experimentelle Verfahren die Methode der richtigen und falschen Fälle. Sie wird heute nach Georg Elias Müller (1850-1934) meist als Konstantreizmethode bezeichnet. Bei experimenteller Kontrolle der Randbedingungen sind die U_S nach beiden Methoden prinzipiell vergleichbar. Die Wahl der Methode hängt von der Reizmodalität, bzw. Qualität ab. Für kontinuierlich variierbare Reize, wie beispielsweise die Helligkeit, ist die Methode der Minimaländerungen angezeigt (König, 1889). Die U_S kann angenähert als Differentialquotient dS/dR angesehen werden, wenn, auf die Größe von dS einflussnehmende methodenbedingte Faktoren erkannt, und wenn möglich ausgeschlossen werden. Bei verbleibend konstanten Randbedingen gilt dann näherungsweise die allgemeine Weber-Funktion (1a) als Differentialgleichung:

$$U_S = dS/dR = f(S), \text{ und reziprok: } dR/dS = 1/f(S) . \quad (1b)$$

Sie wird von Fechner im Fall des Weber'schen Gesetzes ($f(S)=kS$ (1)) als Fundamentalformel bezeichnet. Integration ergibt dann die Empfindungsintensität R als:

$$R = (\int dS/S)/k = (\ln(S))/k + C . \quad (3)$$

Die Integrationskonstante C ($C=-(\ln(S_1))/k$) bestimmt mit einem festzulegenden Reiz S_1 den Skalenursprung. Es wird die von Fechner als Maßformel bezeichnete Form des Weber-Fechner'schen Gesetzes halblogarithmisch mit dem Anstieg $1/k=S/U_S$ erhalten:

$$R = (\ln(S/S_1))/k \quad (3a)$$

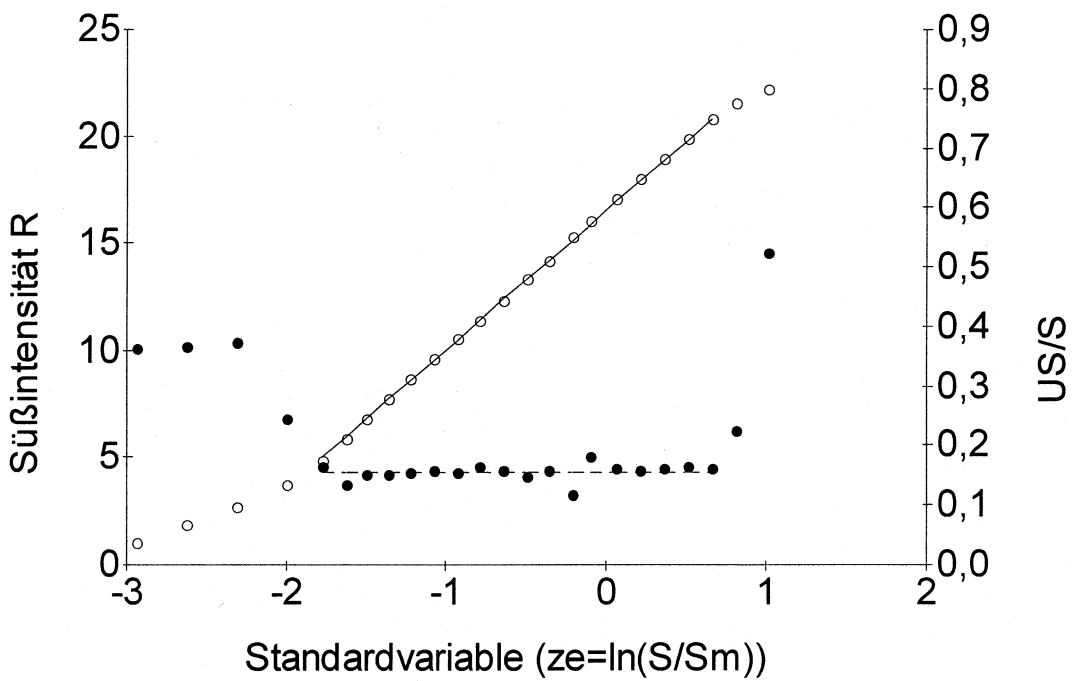
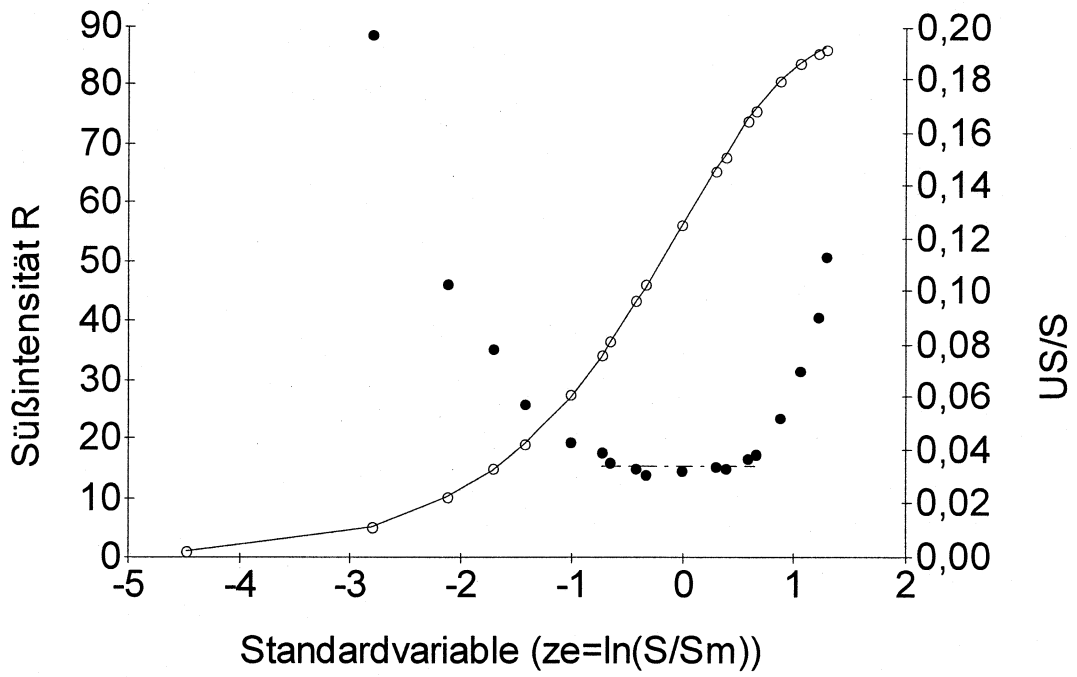
Unabhängig von dieser Skalierung ist die Maßformel (3a) als Interpolationshilfe für Integrationen zwischen den Stützstellen beliebiger Weberfunktionen brauchbar (König, 1895):

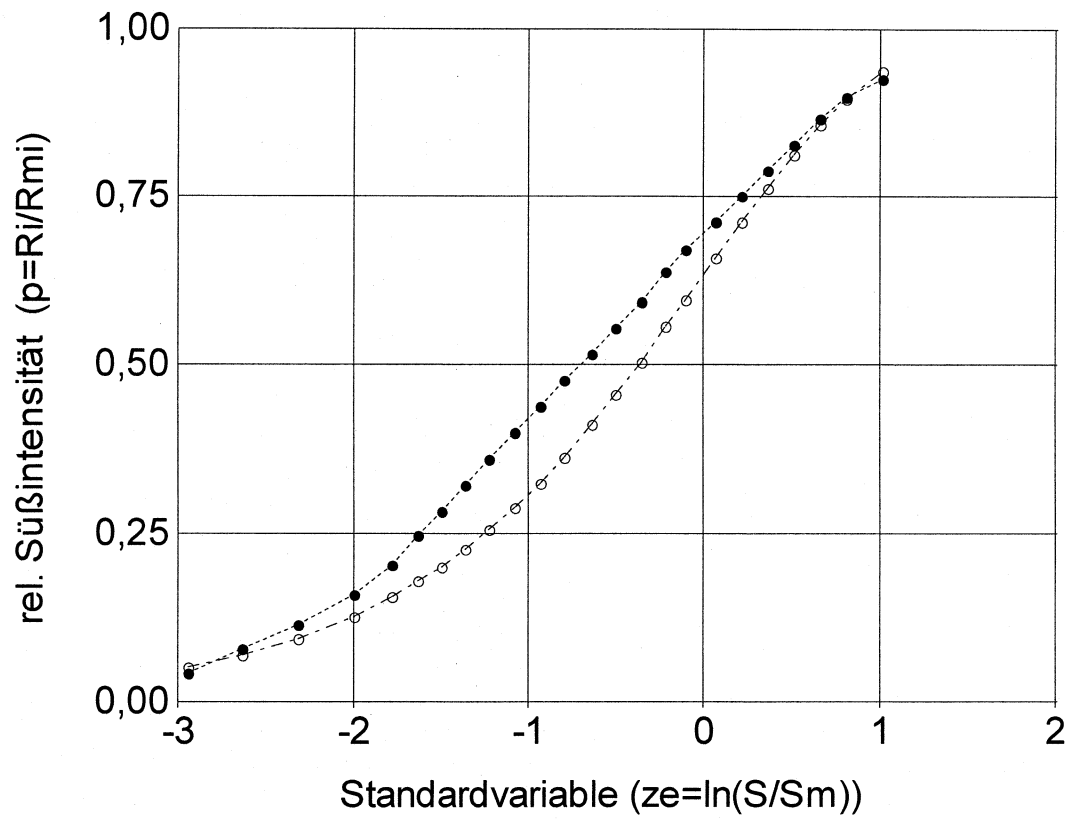
$$R_2 - R_1 = (1/k_1 + 1/k_2)(\ln(S_2/S_1))/2 \quad (3b)$$

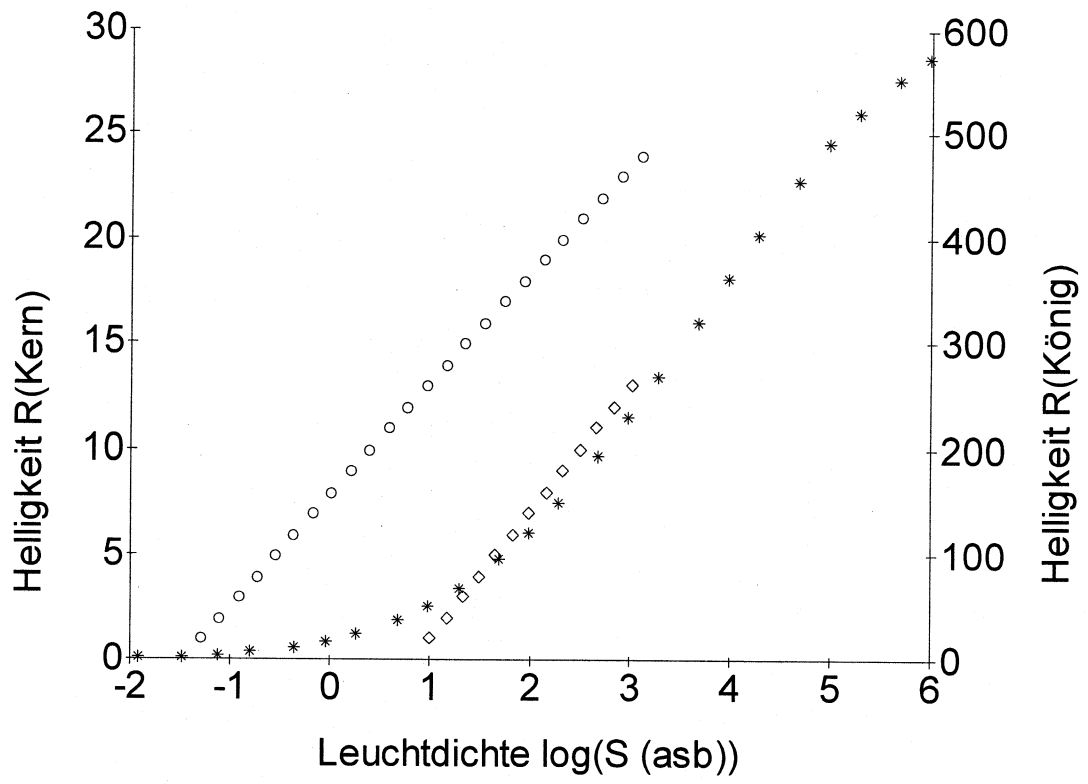
Eine notwendige experimentelle Überprüfung des Gesamtverfahrens kann letztlich nur auf der integrierten Ebene R vorgenommen werden. Selten möglich, aber am Beispiel der Süßintensität vollständig, ist eine Kreuzvalidierung. Dazu werden experimentell bestimmte Weberfunktionen $U_S=f(S_i)$ adäquater Reizstoffe integriert und die berechneten $R=f(S)$ mit den Ergebnissen experimenteller Gleichheitsbestimmungen verglichen. Die Bestimmung der intensitätsgleichen adäquaten Reize S ist mit beiden vorgenannten Methoden möglich (Hoppe, 1994). Von Frieda Lemberger wurde mit dem Verfahren der richtigen und falschen Fälle festgestellt, dass für Saccharin und Saccharose zwar in weiten Bereichen das Weber'sche Gesetz (1) gilt, aber die jeweils berechneten Intensitäten R nicht den dazugehörigen intensitätsgleichen Reizen S entsprechen (Lemberger, 1908). Erst 1977 wurde gefunden, dass die Ursache dafür in der obligatorischen Wasserspülung zwischen den paarweisen Vergleichen lag (Hoppe, 1977). Wenn der dadurch bedingte Nullbezug durch Spülung mit dem Basisreiz S, aber auch bereits durch Verbot der Wasserspülung, aufgehoben wird, so werden wesentlich kleinere US gefunden. Die Differenz ist von der Lage des Basisreizes S im Kontinuum abhängig. Es werden jetzt exponentielle Weberfunktionen ermittelt, wo die berechneten Süßintensitäten R auch den aus intensitätsgleichen Reizen im gesamten möglichen Bereich entsprechen. (Hoppe, 1984, 1991, 1995, 2008).

Die vorliegende Arbeit soll, angeregt durch eine historische Würdigung der Bedeutung Fechners für die psychologische Methodik (Brauns, 1990), die Gewichtsversuche Fechners zur Bestätigung des Weber'schen Gesetzes, auch in Anbetracht des oben angeführten Dilemmas, ausführlich darstellen und erweitert auswerten. Dabei soll besonders auf die Randbedingungen und die bestmögliche Weberfunktion eingegangen werden.

Fechner reloaded. (Wundt (1908): S.668 König, S.676-677 Fechner)





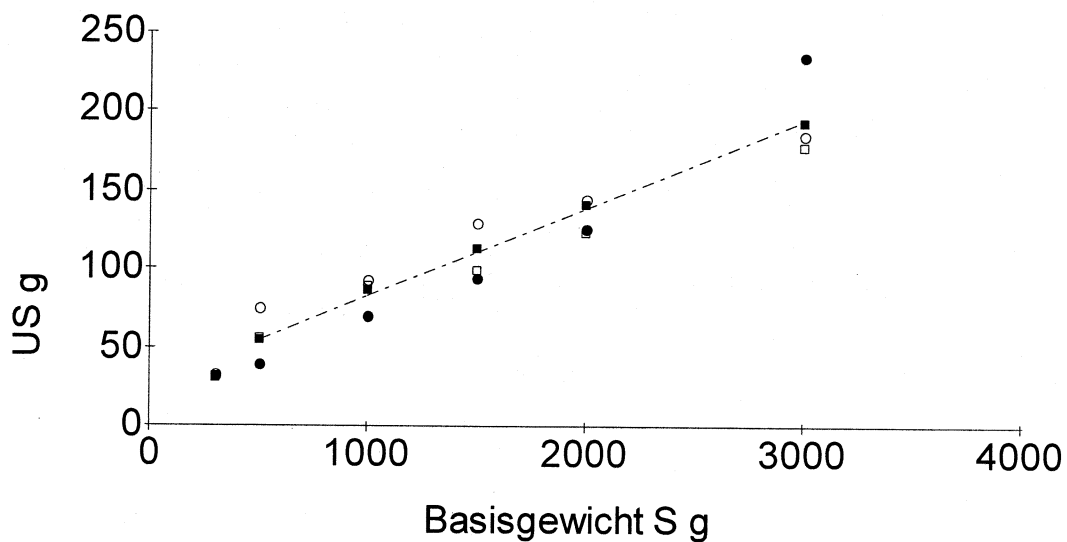


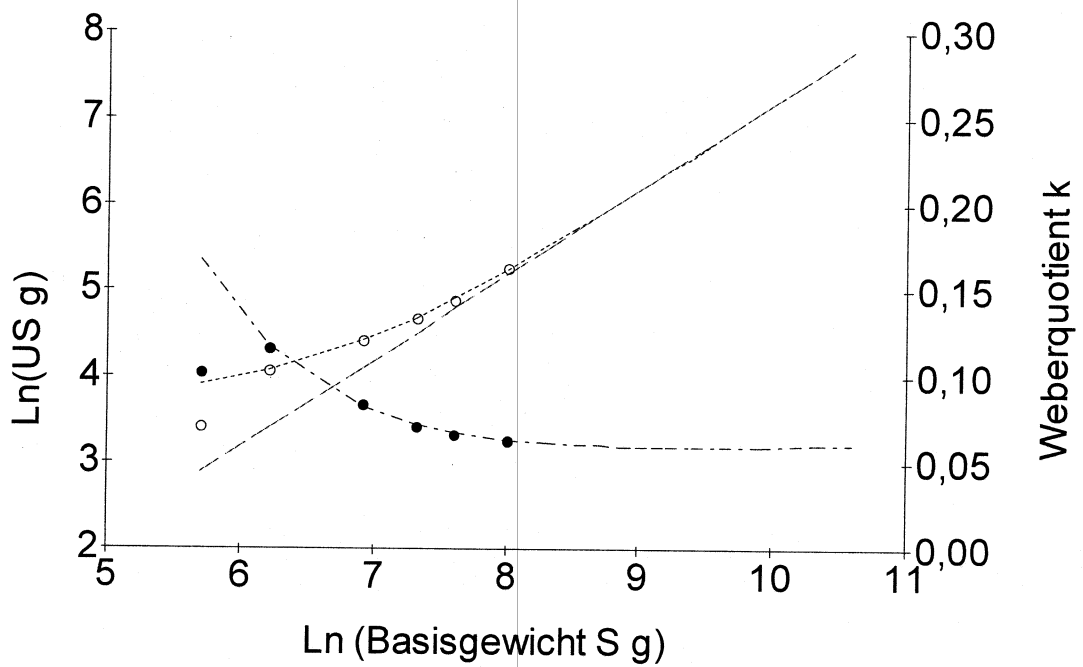
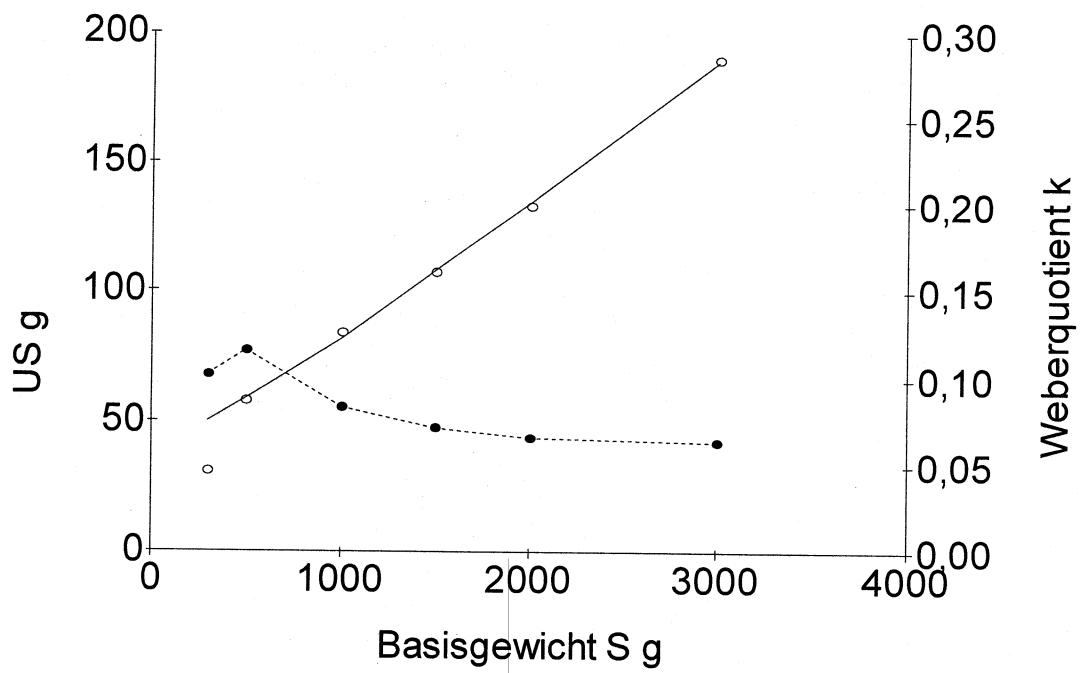
kern1aw

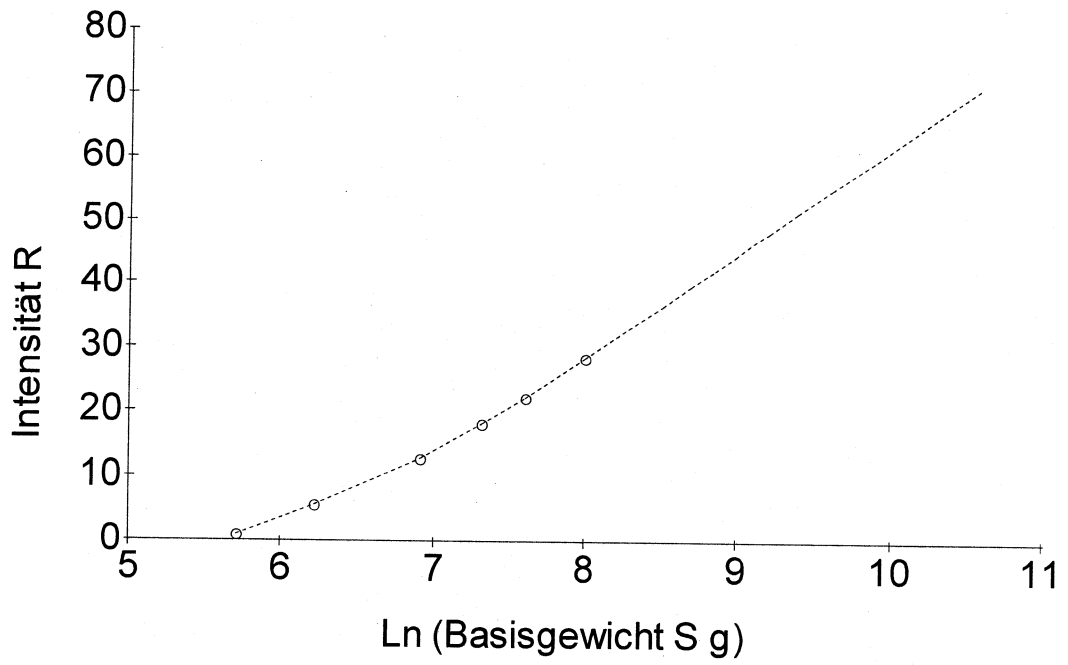
2. Fechners Gewichtvergleiche mit der Methode der richtigen und falschen Fälle zur Bestätigung des Weber'schen Gesetzes.

Fechner schreibt dazu in seinen Elementen der Psychophysik unter der Überschrift, d) Spezielles zur Methode richtiger und falscher Fälle, in Anwendung auf die Gewichtsversuche, auf S.92 einleitend: „Die (im Jahre 1855 begonnenen) Versuche, auf deren Grundlage die folgenden Ausführungen über die Methode der richtigen und falschen Fälle beruhen, wurden zuerst in der einfachen Absicht einer genaueren Prüfung des Weberschen Gesetzes unternommen, später im Interesse der Ausbildung der Methode selbst fortgeführt und weiter ausgedehnt, nachdem sich gezeigt hatte, dass die Prüfung, die ich im Auge hatte, eine zuvorige Untersuchung der Bedingungen der Genauigkeit der Methode, eine Ausbildung ihrer experimentalen und Rechnungsseite erst forderte, welche zurzeit nicht vorlag.“

Von Dezember 1856 bis Januar 1857 führte er dann







Tabellenanhang:

Tab. 1: Mittlere untere Basisleuchtdichten S, Unterschiedsschwellen U_S und Weberquotienten U_S/S berechnet aus den Experimentaldaten von König (1903) S. 138 für weißes Licht in Abhängigkeit von der oberen Basisleuchtdichte J.

J asb	Winkel alpha					S asb	U_S asb	U_S/S		
	König grad min	Brodhuhn grad min	K. deg	B. deg	M rad					
0,02	39	49	39	4	39,82	39,07	0,6884	0,0119	0,0081	0,6767
0,05	34	50	35	8	34,83	35,13	0,6106	0,0336	0,0164	0,4897
0,1	31	32	29	55	31,53	29,92	0,5363	0,0739	0,0261	0,3532
0,2	28	1	26	8	28,02	26,13	0,4725	0,1586	0,0414	0,2613
0,5	23	28	22	8	23,47	22,13	0,3979	0,4249	0,0751	0,1767
1	19	20	18	49	19,33	18,82	0,3329	0,8932	0,1068	0,1196
2	17	2	16	48	17,03	16,80	0,2953	1,8307	0,1693	0,0925
5	13	41	13	0	13,68	13,00	0,2329	4,7338	0,2662	0,0562
10	12	19	12	4	12,32	12,07	0,2128	9,5540	0,4460	0,0467
20	11	15	10	20	11,25	10,33	0,1884	19,299	0,7012	0,0363
50	10	12	9	20	10,20	9,33	0,1705	48,561	1,4388	0,0296
100	9	48	8	35	9,80	8,58	0,1604	97,448	2,5516	0,0262
200	8	29	8	30	8,48	8,50	0,1482	195,64	4,3610	0,0223
500	7	53	8	27	7,88	8,45	0,1425	489,91	10,090	0,0206
1000	7	36	7	45	7,60	7,75	0,1340	982,16	17,837	0,0182
2000	7	40	7	39	7,67	7,65	0,1337	1964,5	35,519	0,0181
5000	7	37	7	10	7,62	7,17	0,1290	4917,2	82,756	0,0168
10000	7	33	7	16	7,55	7,27	0,1293	9833,7	166,25	0,0169
20000	7	32	7	7	7,53	7,12	0,1278	19675	325,11	0,0165
50000	7	30	7	55	7,50	7,92	0,1345	49100	899,55	0,0183
100000	7	57	8	20	7,95	8,33	0,1421	97994	2005,7	0,0205
200000	9	17	9	47	9,28	9,78	0,1664	194514	5486,1	0,0282
500000	9	23	10	23	9,38	10,38	0,1725	485269	14731	0,0304
1000000	10	43	11	2	10,72	11,03	0,1898	964405	35595	0,0369

Leuchtdichte J: $1 \text{ cd/m}^2 = 3,14 \text{ asb}$

Basisreiz: $S = J \cos^2(\alpha)$

Unterschiedsschwelle: $U_S = J \sin^2(\alpha)$

Weberquotient: $U_S/S = J \tan^2(\alpha)$

Absolutschwelle: $0,000725 \text{ asb}$

Tab. 2: Mittlere Unterschiedsschwellen U_S berechnet aus Tab. 1 bis 5 bei Kern (1953) in Abhängigkeit von der Leuchtdichte S . Dort werden Quotienten S/U_S für 10 Vp. angegeben. Die x-Symbole zeigen, dass eine Erfassung nur wenigen Vp möglich war. Die U_S wurden experimentell in einem kleinen zweigeteiltem Feld mit einstellbaren Leuchtdichten bestimmt, welches sich in einem großen Umfeld mit für jede Reihe konstanter Leuchtdichte (Anker) befindet.

S asb	Unterschiedsschwellen bei unterschiedlichen Ankerleuchtdichten				
	0,1 asb	0,6 asb	1 asb	10 asb	100 asb
0,03	x				
0,05	0,04				
0,10	0,06	x	x		
0,20	0,10	0,17	0,18		
0,30	0,15	0,16	0,26		
0,50	0,23	0,17	0,21		
0,60		0,18			
1,00	0,43	0,41	0,16	0,86	
1,50		0,68			
2,00	0,98	0,95	0,60	1,24	
3,00			1,07	1,57	
5,00	2,52	2,45	2,17	2,10	
10,00	5,19	5,08	4,47	2,36	6,46
20,00	11,20	10,64	9,75	7,55	10,68
30,00			15,09	14,15	13,03
50,00	28,05	28,26	26,04	24,75	17,52
100,00	58,48	54,81	53,48	50,22	28,21
200,00	122,54	116,66	119,10	118,19	92,09
300,00					159,01
500,00	321,82	303,04	310,73	305,95	285,78
1000,00	656,52	638,63	657,68	621,68	613,10

Literatur: (Mokin11g)

- Antolak, K., Bykowska, M. & Miler, K. B. M (1983): Some comments on the concentration/intensity relations in taste sensations. *Nahrung* 27, 519-520.
- Baylor, D. A. & Fuortes, M. G. F. (1970): Electrical responses of single cones in the retina of the turtle. *J. Physiol. (Lond.)* 207, 77-92.
- Beidler, L. M. (1954): A Theory of Taste Stimulation. *J. Gen. Physiol.* 38, 133-139.
- v.Bertalanffy, L., Beier, W. & Laue, R. (1977): Biophysik des Fließgleichgewichts. Berlin: Akademie-Verlag und Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn, 2. Aufl. S. 2.
- Birch, G. G., Latymer, Z. & Hollaway, M.(1980): Intensity/time relationships in sweetness: evidence for a queue hypothesis in taste chemoreception. *Chem. Senses* 5, 63-78.
- Brauns, H.-P. (1990): Fechners experimentelle Versuchsplanung in „Elemente der Psychophysik“ im Lichte heutiger Methodenlehre des psychologischen Experiments. *Psychol. u. Geschichte* 1. Heft 4, 11-23.
- Creutzfeldt, O. D.(1982): Informationsübertragung und -weiterleitung im Nervensystem. In: Hoppe, W., Lohmann, W., Markl, H. & Ziegler, H.: Biophysik. (776). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Fechner, G. T.(1860): Elemente der Psychophysik. Leipzig: Breitkopf u. Härtel.
- Fechner, G. T. (1888). Ueber die psychischen Maßprinzipien und das Weber'sche Gesetz. *Philosophische Studien* 4, 161-230.
- Fisher, R. A. & Yates, F. (1963). Statistical tables. Edinburgh: Oliver & Boyd, 6. Aufl..
- Gerth, E.(1978): Zur analytischen Darstellung der Schwärzungskurve. III. Die Reaktionstensoren des photographischen Prozesses. *J. Signal AM* 6, 421-439
- Grüsser, O.-J. (1980): Gesichtssinn und Okulomotorik. In: Schmidt, R. F. &Thews, G.: Physiologie des Menschen. (270). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Guilford, J. P.(1954): Psychometric Methods. New York, Toronto, London McGraw Hill Book, 2. Aufl.
- Handwerker, H. O.(1993): Allgemeine Sinnesphysiologie. In: Schmidt, R. F.: Neuro- und Sinnesphysiologie. (218). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo Hong Kong Barcelona Budapest.
- Harte, C.(1965): Anwendung der Covarianzanalyse beim Vergleich von Regressionskoeffizienten. *Biometr. Z.* 7, 151-164.
- Hoppe, K.(1977): Untersuchungen zum Reiz-Antwortverhalten des Geschmackssinns unter Berücksichtigung der Adaptation am Beispiel des Süßgeschmacks der Saccharose, *Nahrung* 21, K39-K42.
- Hoppe K.(1980): Beiträge zur Psychophysik des Süßgeschmacks. 1. Mitt.: Aufgabenstellung und Untersuchungsmethoden. *Nahrung* 24, 967-979.
- Hoppe K.(1980): Beiträge zur Psychophysik des Süßgeschmacks. 2. Mitt.: Eine statistische Theorie des Reiz-Reizantwortverhaltens von Süßgeschmacksrezeptoren. *Nahrung* 25, 151-165.

- Hoppe, K. (1983a): Zur Psychophysik und Theorie des Süßgeschmacks.
Diss. B (Dr. sc. nat., Biochemie u. Reaktionskinetik), Humboldt-Univ., Berlin.
- Hoppe, K. (1983b): Systemanalysis of the sweetness receptor.
Studia biophysica 97, 97-102.
- Hoppe, K. & Riedel, Angelika (1983c): Aufnahme von Reiz-Empfindungs-
Beziehungen in der Geschmacksqualität "Salzig". Nahrung 27, 607-608.
- Hoppe, K. (1984a). Prüferauswahl bei sensorischen Differenzprüfungen zur
Aufstellung von Reiz-Empfindungs-Skalen des Geschmackssinns.
Nahrung 28, 423-429.
- Hoppe, K. (1984b). Beiträge zur Psychophysik des Süßgeschmacks, 4. Mitt.:
Methodischer Nachtrag zum Einfluss der Versuchsanordnung und des
Spülregimes bei Differenzprüfungen. Nahrung 28, 983-993.
- Hoppe, K. (1991). Fechner-Skalierung der Süßintensität und Vergleich
verschiedener Methoden zur Bestimmung der Unterschiedsschwelle.
Ernährungsforschung 36, 81-83.
- Hoppe, K. (1994): Beiträge zur Psychophysik des Süßgeschmacks 5. Mitt.:
Untersuchungen zum Einsatz sequentieller Staircasemethoden bei der
Bestimmung intensitätsgleicher Konzentrationspaare.
Nahrung 38, 283-294.
- Hoppe, K. (1995): Beiträge zur Psychophysik des Süßgeschmacks 7. Mitt.:
Experimentelle Neubestimmung der Süßintensitätsparameter
von Acesulfam, Aspartam, Cyclamat, Saccharin, Glucose und Sorbitol,
Nahrung 39, 277-283.
- Hoppe, K. (2001): Erstellung eines Compartmentmodells des Süßrezeptors zur
Vorhersage der Süßintensität beliebiger Mischungen ausgewählter süßer
Verbindungen in wässriger Lösung (AiF-Vorhaben Nr. 12095B). Rehbrücke:
<http://www.dife.de/de/publikationen/ABL04.pdf>
- Hoppe, K. (2008): Das Weber-Fechner'sche Gesetz unter besonderer
Berücksichtigung der Süßintensität.
<http://www.ewald-gerth.de/Weber-Fechner.pdf>
- Hoppe, K. (2009a): Beiträge zur Psychophysik des Süßgeschmacks:
Methodische Untersuchungen zur Verhältnisschätzung.
<http://www.ewald-gerth.de/konrad-hoppe/magn10.pdf>
- Hoppe, K. (2009b): Beiträge zur Psychophysik des Süßgeschmacks:
Untersuchungen zur Intensitätskategorisierung im überschwelligem
Reiz-Empfindungskontinuum
<http://www.ewald-gerth.de/konrad-hoppe/kat10c.pdf>
- Kamo, N., Kashiwagura, T., Kurihara, K. & Kobatake, Y. (1980):
A Theory of Dynamic and Steady Responses in Chemoreception.
J. theor. Biol. 83, 111-130.
- Kern, E. (1953): Der Bereich der Unterschiedsempfindlichkeit des Auges bei
festgehaltenem Adaptationszustand. Z. Biol. 105, 237-245.
- Knudsen, Vern O. (1923): The Sensibility of the Ear to small Differences of
Intensity and Frequency. Phys. Rev. 21, 84-102.

- König, A. & Brodhun, E.(1888, 1889): Experimentelle Untersuchungen über die psychophysische Fundamentalformel in Bezug auf den Gesichtssinn.
In: Gesammelte Abhandlungen zur physiologischen Optik von Arthur König, S. 116-139, Leipzig, Verlag von Johann Ambrosius Barth (1903)
- König, A. (1895): Über die Anzahl der unterscheidbaren Spektralfarben und Helligkeitsstufen. Z. Psychol. u. Physiol. Sinnesorgane 8, 375-380.
- Lemberger, F. (1908). Psychophysische Untersuchungen über den Geschmack von Saccharin und Zucker. Pflügers Arch. ges. Physiol. 123, 293-311.
- Michaelis, L. & Menten, M. (1913): Die Kinetik der Invertasewirkung. Biochem. Z. 49, 333-369.
- Pfanzagl, J.(1962): Über die stochastische Fundierung des psychophysischen Gesetzes. Biometrische Zeitschrift 4, 1-14.
- Pütter, A.(1918): Studien zur Theorie der Reizvorgänge, 1.-4. Mitt. Pflügers Archiv ges. Physiol. 171, 201-261.
- Ranke, Otto F. (1953): Die optische Simultanschwellen als Gegenbeweis gegen das Fechnersche Gesetz. Z. Biol. 105, 224-231.
- Riesz, R. R. (1928): Differential Intensity Sensitivity of the Ear for pure Tones. Phys. Rev. 31, 867-875.
- Romanovsky, J. M., Stepanova, N. V. & Chernavsky, D. S. (1974): Kinetische Modelle in der Biophysik, Jena, VEB Gustav Fischer Verlag
- von Schelling, H.(1944): Gedanken zum Weber-Fechner'schen Gesetz. Abh. Preuß. Akad. Wiss. Mathem.-naturw. Klasse Nr. 5.
- Timofeeff-Ressovsky, N. W. & Zimmer, K. G.(1947): Das Trefferprinzip in der Biologie, Leipzig, S. Hirzel Verlag.
- Trincker, D. (1977): Hell-Dunkel-Adaptation, Bereichseinstellung der Unterschiedsempfindlichkeit, Blendung. In: Lullies, H. & Trincker, D: Taschenbuch der Physiologie, Bd. III/2, S. 722-732, 684-685. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag
- Weber, Erna (1972): Grundriss der biologischen Statistik. (7. Aufl., S.378 ff). Jena, VEB Gustav Fischer Verlag.
- Wundt, W. (1908). Grundzüge der physiologischen Psychologie. (6. Aufl.). 1. Band, (Kapitel 9.5. Gesetze der Empfindungsintensität. S. 614-645). Leipzig: Verlag von Wilhelm Engelmann.
- Zwislocki, J. J.(1973): On Intensity Characteristics of Sensory Receptors: A Generalized Function. Kybernetik 12, 169-183.

Autorenhinweise:

Dr. rer. nat. habil. Konrad Hoppe, Kirschallee 177, 14469 Potsdam. Vormalig Deutsches Institut für Ernährungsforschung Potsdam-Rehbrücke
Februar 2012.

Zum Zusammenhang von Leuchtdichte und Helligkeit

Er formulierte mit Bezug auf Fechner: „Fechner's Bedeutung für die von ihm „Psychophysik“ benannte Wissenschaft....beruht im wesentlichen darauf, dass er die Differentialgleichung des „Weber'schen Gesetzes“ integrierte und dadurch die Intensität der Empfindungen aus der physikalisch messbaren Stärke des Reizes ableitete“. Weiterhin: „Die Aufgabe, welche wir uns stellten, bestand in einer experimentellen Bestimmung der Differentialgleichung selbst, d. h. in einer experimentellen Bestimmung der Unterschiedsschwellen bei wechselnden Intensitäten und zwar von den niedrigsten eben wahrnehmbaren Helligkeiten bis herauf zu solchen Helligkeiten, bei denen in dem Auge bereits schmerzhaft Blendungserscheinungen auftraten.“

Anfangsverlauf

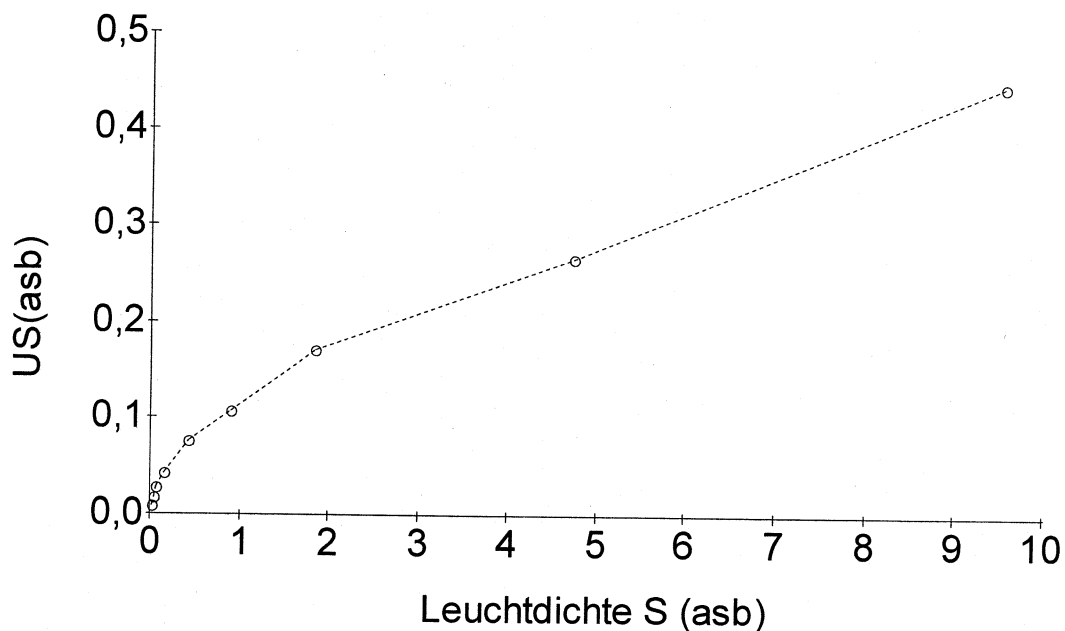
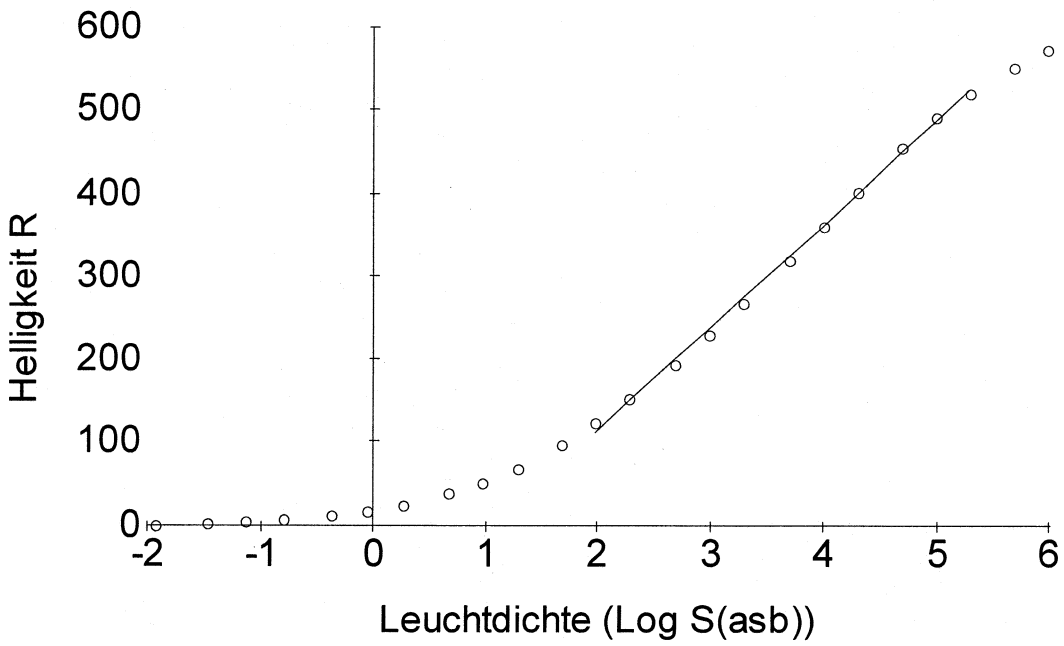
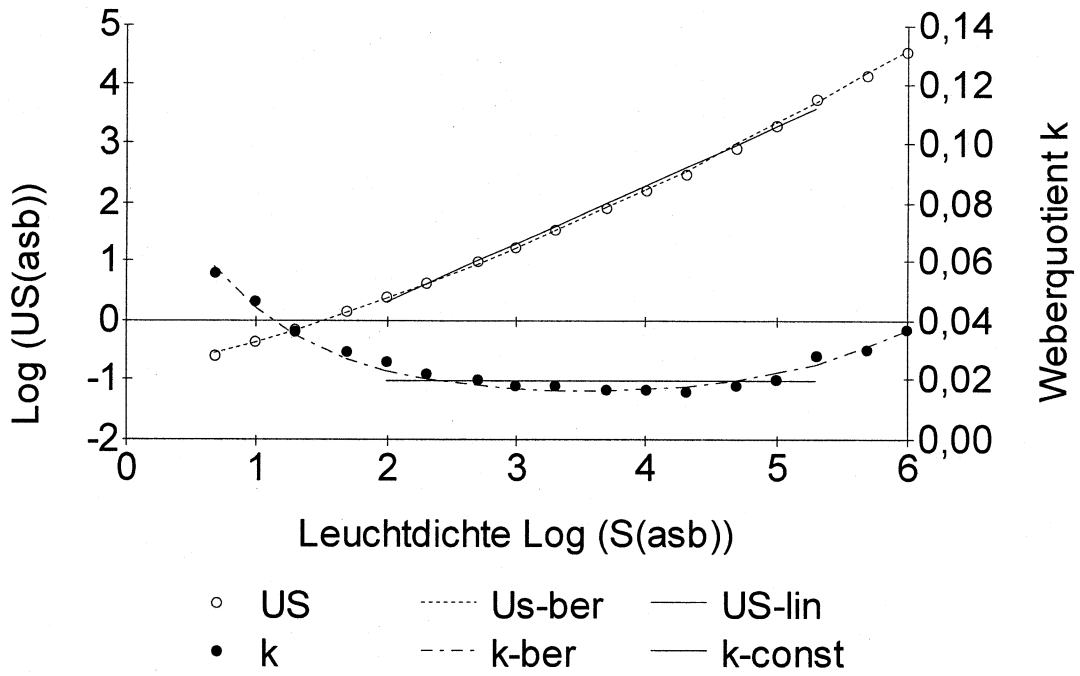


Abb. 2b: Unterschiedsschwellen U_s in Abhängigkeit von der Leuchtdichte S in Apostilb asb (König, 1889, 1902) für den Übergang des skoptischen zum photoptischen System.



Königsw (für S & k)

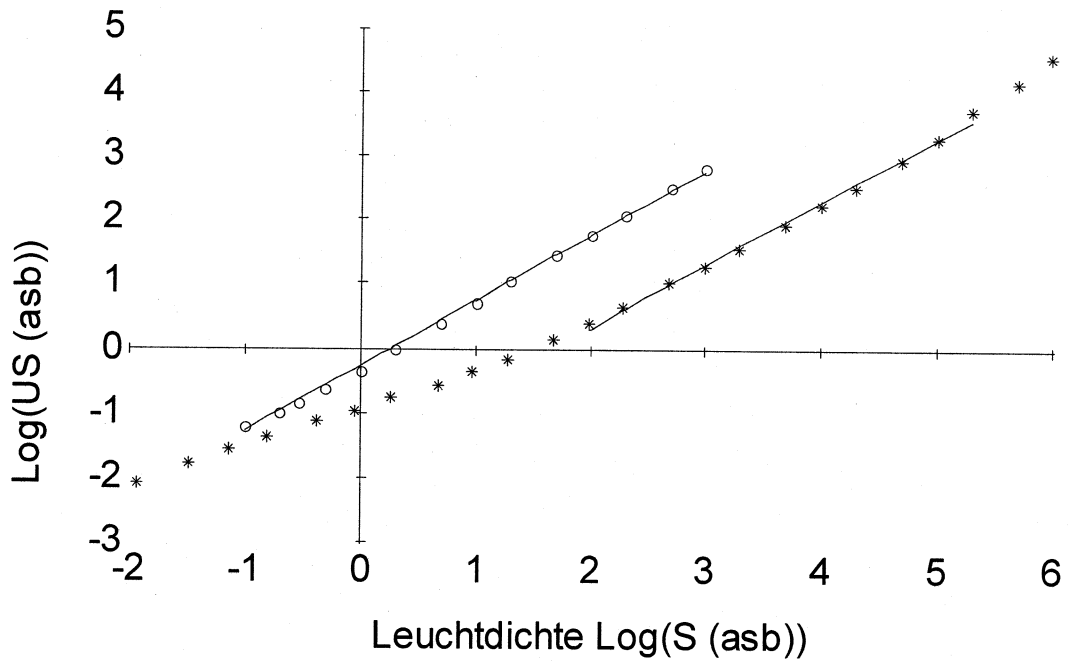
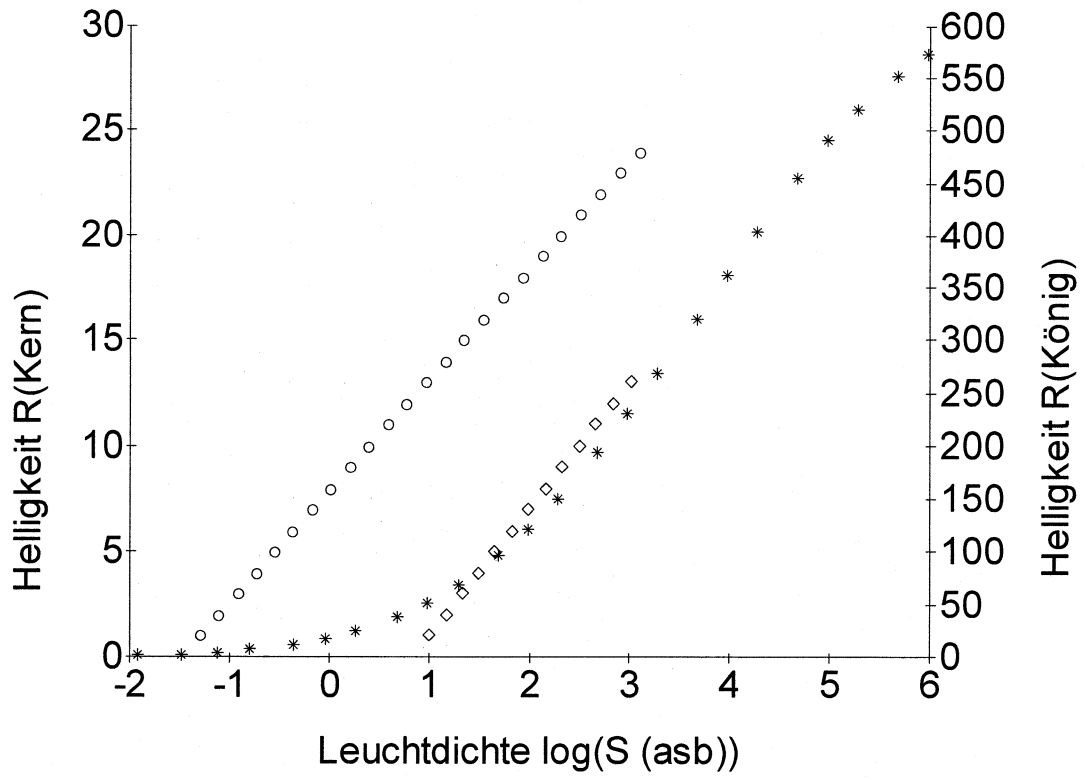


Abb. 9a: Unterschiedsschwellen U_S in Abhängigkeit von der Leuchtdichte S in Apostilb asb doppeltlogarithmisch dargestellt. Die erste Funktion mit offenen Kreisen ist Ergebnis aus Ankerversuchen von Kern (1953) nach Tab. X, während die Sternchen solche mit Adaptation zeigen, die von König, 1889 bestimmt worden sind. 1902)Kern2aw



kern1aw