Statistische Untersuchungen zu Ermittlungsmethoden der Empfundenen Luftqualität

Yong-Sang Yoon

2004

D 83

Statistische Untersuchungen zu Ermittlungsmethoden der Empfundenen Luftqualität

Von der FAKULTÄT III
- Prozesswissenschaften –
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur
Yong-Sang Yoon
aus Südkorea

Promotionsausschuss:
Vorsitzender:
Prof. Dr.-Ing. Felix Ziegler
Gutachter:
Prof. Dr.-Ing. Klaus Fitzner
Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 07. Mai 2004

Berlin 2004

D 83

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde an der Technischen Universität Berlin am Institut für Energietechnik im Fachgebiet Heizungs- und Raumlufttechnik, Hermann-Rietschel-Institut angefertigt. Der Gedanke zu dieser Arbeit entstand auf Anregung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Fitzner.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Fitzner danke ich für die inhaltliche Betreuung und die ausführliche Diskussion der Ergebnisse. Die Fülle an neuen Ideen und das Aufzeigen von Wegen zur Lösung von Problemen haben mich bei der Durchführung der Arbeit sehr unterstützt.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Müller möchte ich mich für die stete Bereitschaft zur Diskussion sowie die schnelle und kritische Durchsicht meiner Dissertation bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Felix Ziegler danke ich für das immer offene Ohr und die angenehme Durchführung der wissenschaftlichen Aussprache.

Das gute Arbeitsklima am Hermann-Rietschel-Institut war natürlich für das Gelingen der Arbeit sehr wichtig. Alle Kollegen waren immer bereit, mich zu unterstützen und bei Diskussionen Anmerkungen und Hilfestellungen zu geben. Für die Unterstützung möchte ich mich ebenfalls bedanken. Bei Herrn Dipl.-Ing. Frank Bitter möchte ich besonders danken.

Einen großen Dank an Klaus und besonders an Roman für das Korrekturlesen der Arbeit. Sie haben für die Korrekturarbeit großzügig Zeit verwendet.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, die sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Meinem Vater und meiner Mutter möchte ich einen besonderen Dank aussprechen und ihnen diese Arbeit widmen.

Berlin, im Mai 2004

Inhaltsverzeichnis

Vorwort I

1 Einleitung.....1

2 Aufgabenstellung.....3

3 Grundlagen.....5

3.1 Physiologische Grundlagen.....5

3.2 Psychophysiologische Grundlagen.....11

3.3 Statistische Grundlagen.....17

3.3.1 Tabellarische Darstellung der Messdaten.....18

3.3.2 Graphische Darstellung der Messdaten.....21

3.3.3 Statistische Kennwerte.....22

3.3.3.1 Maße der zentralen Tendenz.....22

3.3.3.2 Dispersionsmaße.....24

3.3.3.3 Formmaße.....27

3.3.3.4 Zusammenfassung zur Verteilung.....29

3.4 Messverfahren der Luftqualität.....30

3.4.1 Das 2-Punkt-Verfahren.....30

3.4.2 Das 20-Punkt-Verfahren.....33

3.4.3 Das dezipol-Verfahren.....38

4 Mathematisch-statistische Erklärung des Zusammenhangs zwischen der mittleren Akzeptanz und dem Prozentsatz Unzufriedener.....45

4.1 Das mathematisch-statistische Näherungsmodell.....45

4.2 Die Methode der Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Ak und PD bei vorliegender Normalverteilung.....49

4.3 Vergleich der Näherungskurven mit der Summenhäufigkeitsfunktion.....55

4.4 Die Abhängigkeit der Summenhäufigkeitsfunktion von der Standardabweichung.....58

5 Die mathematisch-statistisch ermittelte neue Korrelation zwischen ELQ und PD.....63

5.1 Die Sprungfunktion als das einfache Grenzkriterium zur Zufrieden-/Unzufriedenheit.....63

5.1.1 Der vereinfachte Zusammenhang zwischen ELQ und PD.....64

5.1.2 Die neue Korrelation zwischen ELQ und PD.....67

5.2 Die Methode zur Diskretion der stetigen Normalverteilung.....74

5.3 Die Ermittlung des neuen Zusammenhangs zwischen ELQ und PD.....81

5.4 Der Einfluss der Standardabweichung auf den Zusammenhang zwischen ELQ und PD.....82

5.5 Die S-Funktion der wahrscheinlichen Unzufriedenheit für die Raumluftqualität von HRI.....85

6 Vergleich der Fanger´schen Gleichung mit der S-Funktion.....89

7 Vergleich der unterschiedlichen Bestimmungsverfahren.....93
7.1 Differenz der Empfundenen Luftqualität abhängig von den Messverfahren.....93
7.1.1 Differenz des Messergebnisses beim untrainierten Probanden.....93
7.1.2 Differenz des Messergebnisses beim trainierten Probanden.....103
7.2 Vergleich des Umrechnungsmodells von Wargocki mit der S-Funktion.....107

8 Erklärung der Ursache der von angewendeten Verfahren abhängigen Differenz.....111
8.1 Psychologisches Entscheidungsproblem.....113
8.2 Der Trainingseffekt.....115

9 Zusammenfassung.....119

Literaturverzeichnis.....121

1 Einleitung

Der Mensch erfährt in seinem Alltagsleben eine Vielzahl geruchlicher Wahrnehmungen. Wir alle kennen das angenehme Gefühl, früh am Morgen von Kaffeeduft geweckt zu werden. Gut gelaunt und motiviert startet man in den Tag. Neben positiven Geruchswahrnehmungen haben wir es aber häufig auch mit dem Fall zu tun, dass Gerüche zu einem unangenehmen Eindruck führen. Geruchsimmissionen können einen ungünstigen Einfluss auf das Wohlbefinden und die Gesundheit des Menschen ausüben. Nach Steinheider et al. (1993) und Winnecke et al. (1986) können im Zusammenhang mit der Einwirkung von Geruchsstoffimmissionen somatische und psychosomatische Symptome wie Kopfschmerzen, Schlafstörungen, Übelkeit, Appetitverlust, Konzentrationsschwäche und Benommenheit auftreten. Deshalb werden zwei wichtige Forderungen an die Raumluftqualität gestellt:

- Das Einatmen der Luft darf kein Gesundheitsrisiko darstellen.
- Die Luft soll als frisch und angenehm empfunden werden.

Die Gerüche entstehen in normalen Aufenthaltsräumen nicht nur durch die Ausdünstungen der Menschen, sondern auch von Einrichtungsmaterialien (Möbeln, Teppichen, Tapeten u.a.) und Eindringen verunreinigter und schlecht riechender Außenluft. Es ist zudem weithin bekannt, dass bei klimatisierten Gebäuden die raumlufttechnischen Anlagen selbst zu den Verunreinigungsquellen gezählt werden. Um zumindestens die Forderung nach einer als frisch empfundenen Luft zu erfüllen, sind als erste Maßnahme geruchsaktive Emissionsquellen gründlich zu beseitigen. In allen Fällen, in denen die Entstehung der Gerüche nicht verhindert werden kann, ist eine ausreichende Lüftung zweckmäßig. Je öfter die Raumluft mit frischer Außenluft ausgetauscht wird, desto besser ist die Raumluftqualität. Aus Gründen der Energieeinsparung ist jedoch die unbegrenzte Lüftungsrate in der Praxis nicht möglich. Um die erforderliche Lüftungsmenge, bei der Luft als frisch und angenehm empfunden werden kann, möglichst genau zu ermitteln, muss zuerst die Luftqualität quantitativ bestimmt werden.

Bei dem Vorhaben, die empfundene Luftqualität zu bestimmen, stößt man derzeit auf eine messtechnische Hürde. Bis jetzt gibt es kein zuverlässigeres Messgerät für Innenraumgerüche als die menschliche Nase. Ein Problem der Messung der empfundenen Luftqualität liegt in der Tatsache, dass die geruchsaktive Konzentration im ppm-Bereich oder nieder liegen kann. Quantitative Erfassung von zahlreichen und chemisch teilweise sehr verschiedenen Zusammensetzungen in

der Innenraumluft ist beim heutigen Entwicklungsstand chemisch-physikalischer Instrumente unmöglich. Auch die derzeit hoch entwickelten Geruchssensoren wie Metalloxyd- und Quarzsensoren, Bestandteile der elektronischen Nasen, erreichen ihre Grenzen im Bereich niedriger Konzentrationen von 0,1 – 1 ppm (Schreiber, 2000). Da bei den geruchlichen Wahrnehmungen außerdem eine Vielzahl psychologischer Faktoren eine große Rolle spielt, kann man allein durch eine rein stoffliche Analyse von Luftverunreinigungen den Grad der Unzufriedenheit von Raumnutzern nicht hinreichend erfassen.

Aus diesen Gründen scheint der Einsatz von Menschen zur Beurteilung der Luftqualität nach wie vor unverzichtbar. Erste Vorschläge, die Luftqualität durch Menschen qualitativ bewerten zu lassen, wurden von Yaglou et al. (1936) unterbreitet und von Fanger (1988) weiter entwickelt. Obwohl das von Fanger entwickelte Verfahren der Luftqualitätsbewertung gegenüber anderen Methoden eine Reihe von Vorteilen hat, muss man trotzdem berücksichtigen, dass das Messergebnis durch subjektive Faktoren erheblich beeinflusst wird. Daher sollte ein Verfahren entwickelt werden, mit dem das Messergebnis unter Berücksichtigung solcher Beeinflussungsfaktoren mathematisch-statistisch sicher ausgewertet werden kann.

2 Aufgabenstellung

Zur olfaktorischen Ermittlung der Empfundenen Luftqualität werden zur Zeit drei unterschiedliche Verfahren angewendet. Aus der Verschiedenheit der Verfahren leiten sich zwei unterschiedliche Werteskalierungen für die Luftqualität ab, wie Literaturquellen und Richtlinien (siehe Tabelle 2.1-1) zeigen. Einheitlichkeit besteht bei der Definition der Qualitätsbereiche, die von den Prozentsätzen Unzufriedener abhängig gemacht werden. Die dazugehörigen Angaben zur Empfundenen Luftqualität hängen jedoch vom angewendeten Verfahren ab.

	Prozentwert Unzufriedener %	DIN 1946/2 dp_A	Rietschel dp_A	CR 1752 dp_A	Finnische Richtlinie dp_B	Europ. Audit dp_B
Hohe Qualität	10	0,7	0,6		2,0	2,0
	15			1,0		
Mittlere Qualität	20	1,4	1,4	1,4	4,0	4,0
Niedrige Qualität	30	2,5	2,5	2,5	5,5	6,0
Bestimmungsmethode		2-Punktverfahren			dezipol-Verfahren	

Tabelle 2.1-1: Verschiedene Anforderungen an die Empfundene Luftqualität in dezipol (Fitzner, 2000)

Die verschiedenen Skalen sind seit langem bekannt. Bis jetzt konnte jedoch noch nicht erklärt werden, warum mit den Verfahren, die sich auf der gleichen - der Fanger'schen (Fanger, 1988) – Basis gründen, keine einheitlichen sondern unterschiedliche Messergebnisse erzielt wurden. Auch fehlt bis heute eine klare Antwort auf die Frage, warum bei einer Acetonkonzentration, die gerade den Geruchsschwellenwert von Azeton mittels dynamischer Olfaktometrie nach der VDI-Methode (Schwab, 1996) erreicht, nach dem dezipol-Verfahren die Zahl der unzufriedenen Probanden wegen schlechter Luftqualität so extrem hoch ausfällt. Mangels Erklärung existiert eine Vielzahl von diversen Vermutungen, die den Unterschied zu deuten versuchen.

Das Ziel dieser Arbeit liegt in der Aufstellung eines statistisch-mathematischen Modells, mit dessen Hilfe die verschiedenen Angaben zur Empfundenen Luftqualität geklärt werden können. Dabei werden die bestehenden verschiedenen Ansätze und Erklärungsversuche analysiert und die Ursachen der Abweichungen erforscht.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird als erstes das statistisch-mathematische Modell für das 20-Punkt-Verfahren aufgezeigt (Kapitel 4). Im Anschluss daran kann der Zusammenhang zwischen der Akzeptanz und dem Prozentsatz Unzufriedener mathematisch formuliert werden. Um die Brauchbarkeit dieses neu entwickelten Modells zu überprüfen, wird der funktionale Zusammenhang mit bislang bekannten Funktionen verglichen.

Das Modell wird weiterentwickelt, um den Zusammenhang zwischen der Empfundenen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener festzustellen (Kapitel 5). Zur Feststellung des Zusammenhangs wird zuerst eine neue Summenhäufigkeitsfunktion ermittelt. Sie wird als Kriterium für die Zufrieden-/Unzufriedenheit bei den jeweils bewerteten einzelnen Empfundenen Luftqualitäten herangezogen. Besondere Bedeutung erlangt das Kriterium bei der Erklärung des Unterschieds zwischen trainierten und untrainierten Probanden. Die vorliegende Arbeit wird zeigen, dass der Unterschied zwischen trainierten und untrainierten Probanden nicht durch die verschiedenen Verfahren, sondern durch das Training des Probandenkollektives hervorgerufen wird. Um den Einfluss des Trainingseffekts auf das Messergebnis zu verdeutlichen, wird statt des S-förmigen Kriteriums die Fanger'sche Exponentialfunktion angewendet (Kapitel 6). In Kapitel 7 hingegen werden die verschiedenen Angaben auf die unterschiedlichen Verfahren bezogen analysiert. Die Ursachen für die unterschiedlich ausfallenden Messergebnisse werden anschließend in Kapitel 8 zusammenfassend dargelegt.

3 Grundlagen

3.1 Physiologische Grundlagen

Jede Körperzelle ist auf regelmäßige Nahrungsmittel- und Sauerstofflieferungen angewiesen. Der Körper nimmt die benötigte Luft über die Nase und den Mund auf. Über die Nase einzuatmen hat viele Vorteile. Hier kann die Luft für den Weg in die Lunge vorbereitet werden. Staub und Bakterien werden ausgefiltert. Die Luft wird mit den vielen feinen Blutgefäßen in der Nasenschleimhaut auf Körpertemperatur erwärmt. Durch die Schleimhautsekrete wird die Luftfeuchtigkeit der einströmenden Luft im Nasenbereich von 35% auf 80% befeuchtet. Der Großteil der Luft wird über den Nasenrachenraum hindurch zur Lunge weitergeleitet. Ein Teil gelangt zu den beiden kleinen Riechfeldern, die sog. Regio olfactoria (Riechepithel), in der oberen Nasenmuschel. Diese Region ist für die Geruchswahrnehmung verantwortlich.

Die Nase wirkt, genau wie unsere Augen und Ohren, als Empfänger von Reizen, die aus der näheren und weiteren Umgebung kommen. Der Geruchssinn versorgt den Organismus auf diese Weise mit Informationen, die diesem bei der Beschaffung von Nahrung oder bei der Vermeidung von Gefahren von Nutzen sein können.

Es gibt keinen Zweifel, dass für die Wahrnehmung die Sinnesorgane notwendig sind. Welche Funktion haben dann die Sinnesorgane bei der Wahrnehmung? Um diese Frage zu beantworten, muss man sich nach Roth (1998) der Tatsache bewusst sein, dass das Gehirn als Zentralnervensystem von den Umwelt „isoliert“ ist. Das Gehirn ist dasjenige Organ, welches Information über die Umwelt gewinnen und in ein den aktuellen Verhältnissen und den allgemeinen Überlebensbedingungen angepasstes Verhalten umsetzen muss. Das Gehirn ist aus Nervenzellen aufgebaut, die über spezifische elektrische Impulse, in der Regel Aktionspotentiale, miteinander kommunizieren. Das Gehirn ist deshalb für Umweltereignisse wie elektromagnetische Wellen, Schalldruckwellen, chemische Moleküle und mechanischen Druck unempfindlich. Die Nervenzellen, zumindest bei den Wirbeltieren, reagieren auf derartige physikalische oder chemische Ereignisse grundsätzlich nicht. Sie werden nur durch spezielle elektrische Signale, nämlich Nervenpotentiale, oder bestimmte chemische Moleküle, Transmitter und Neuropeptide, erregt oder in ihrer Aktivität gehemmt. Aus diesen Überlegungen wird nun die Funktion der Sinnesorgane und -rezeptoren deutlich: sie müssen die spezifischen Einwirkungen von physikalischen und chemischen Umweltreizen in Ereignisse umwandeln, durch die Nervenzellen in ihrem Aktivitätszustand

verändert (erregt oder gehemmt) werden können. Die Sinneszellen übersetzen also das, was in der Umwelt passiert, in die „Sprache des Gehirns“ (G. Roth, 1998).

Bevor wir den Prozess der Umwandelung von physikalischen und chemischen Umweltereignissen in Nervenimpulse erklären, wird der anatomischer Aufbau der Nase in Bild 3.1-1 schematisch dargestellt.

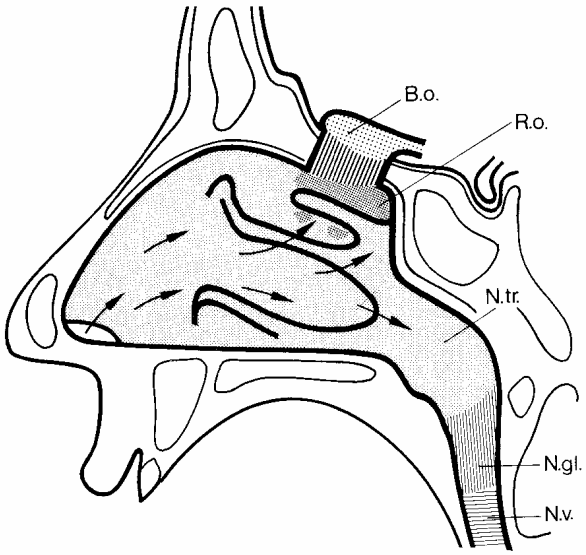

Bild 3.1-1: Lage und Ventilation der Riechschleimhaut in der menschlichen Nase aus lateraler Sicht. Die Regio olfactoria (R.o.) beschränkt sich weitgehend auf die obere Conche. Die von den Riechzellen der Regio olfactoria fortführenden Axone ziehen als Fila olfactoria zum Bulbus olfactorius (B.o.). Die Einzugsbereiche des Nervus trigeminus (N. tr.), Nervus glossopharyngeus (N. gl.) und Nervus vagus (N. v.) sind eingetragen (nach Altner, 1980b aus K. J. Burdach, 1988).

Die Nase führt im Bereich der Regio olfactoria eine chemosensorische Analyse der Atemluft durch. Die Rezeptoren für die Riechmoleküle befinden sich in der Riechschleimhaut. Die Riechschleimhaut dehnt sich jeweils einerseits ungefähr 2,5 bis fünf Quadratzentimeter aus (B. Müller, 2002). Der Riechschleimhaut kann durch eine besondere Art des Einatmens „Schnüffeln“ oder „Tiefeinatmen“ eine erhöhte Menge von Atemluft zugeführt werden. Dies hat zur Folge, dass mehr Sinneszellen aktiviert werden und wir den aufsteigenden Geruch wesentlich intensiver wahrnehmen können. Allein die Art der Einatmung kann die wahrgenommene Geruchsintensität bei konstanter Konzentration von Geruchsstoffen beeinflussen.

In ihr finden sich vier unterschiedliche Zelltypen, nämlich Riechzellen, Stützzellen, Basalzellen und Drüsenzellen. Der anatomische Aufbau der Riechschleimhaut ist in Bild 3.1-2 dargestellt.

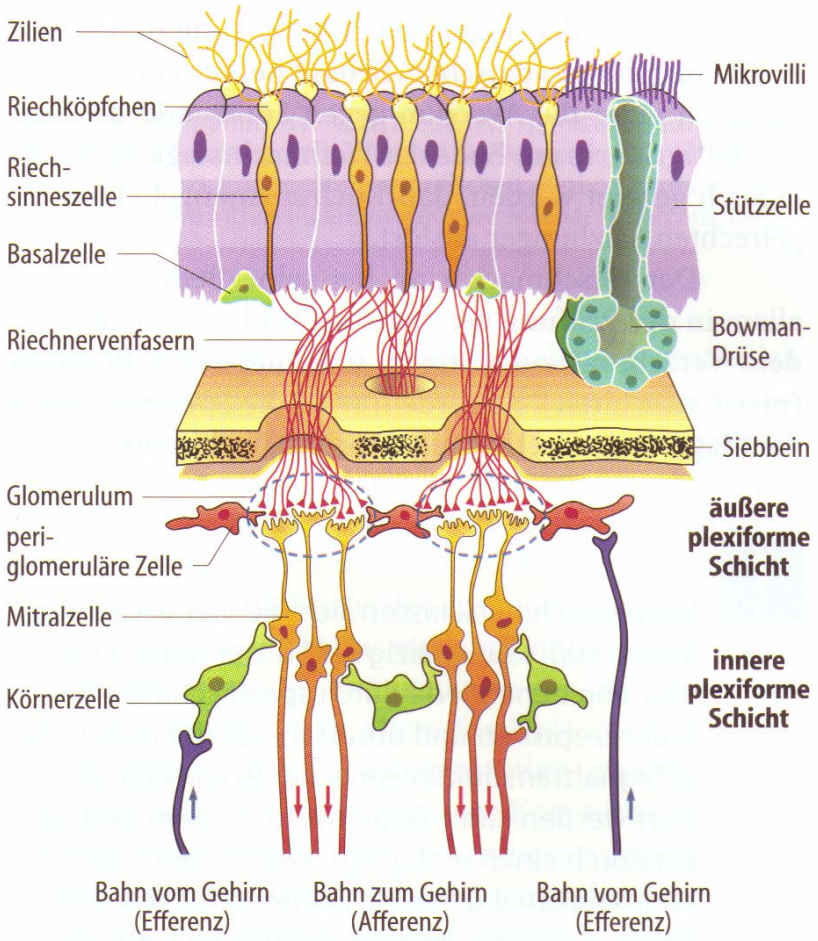

Bild 3.1-2: Schematischer Aufbau der Riechschleimhaut mit den Verbindungen zum Riechkolben (Schmidt et al., 2000)

In der Reichschleimhaut drängen sich zwischen stabilisierenden Stützzellen etwa 10 – 20 Millionen Sinneszellen (Winneke, 1994), an deren Enden sich Zilien (Riechhärchen) befinden. Sie sind fest in einer Schleimschicht eingebettet. Sie reagieren mit den vorüberdriftenden Riechmolekülen der Atemluft, die in die Schleimschicht eingedrungen sind. Alle Riechstoffe müssen also erst in der Schleimschicht gelöst werden, damit die Zilien die Geruchsmoleküle aufspüren und elektrische Impulse erzeugen. Jede Sinneszelle spricht dabei nur auf ganz bestimmte Moleküle an. Nachdem ein Riechhärchen erregt worden ist, leitet es

über die Riechsinneszelle einen Nervenimpuls an einen hochspezialisierten Teil des Gehirns, den sogenannten Riechkolben, weiter. Dort findet eine erste Auswertung der eingegangenen Informationen statt. Von der Zahl der aktivierten Sinneszellen hängt die Stärke des Geruchsreizes ab, wobei die räumliche Anordnung bzw. das Muster der aktivierten Sinneszellen auf der Riechschleimhaut Auskunft über die Art des jeweils aufgenommenen Geruchs gibt. Auf diese Art kann der Mensch mehrere tausend Duftstoffe unterscheiden. Der Riechkolben gibt seine Information an das Riechhirn weiter. Dort erfolgt nun die weitere Auswertung des Musters. Zunächst wird es mit bereits gespeicherten Mustern verglichen, d.h., das Gehirn prüft, ob der spezifische Geruch bekannt ist oder nicht. Ist er unbekannt, wird er neu abgespeichert, wobei er auf Ähnlichkeiten geprüft und zu bekannten Gerüchen eingeordnet wird. Ein einmal abgespeichertes Muster geht nicht mehr verloren, es kann immer wieder als Information abgerufen werden. Die Erinnerung an bestimmte Gerüche ist deswegen beim Menschen besonders gut ausgeprägt. Vom Riechhirn aus führen die Nervenbahnen weiter zum limbischen System. Dort sitzen u.a. die Zentren für unser Verhalten, unsere Emotionen sowie unsere Stimmungen, so dass die Gerüche, die wir täglich aufnehmen, auch sofort mit unseren Gefühlen verknüpft sind. Nach der Auswertung im limbischen System werden die Geruchsreize schließlich zum Großhirn weitergeleitet, wo die eingehenden Informationen nur bewusst wahrgenommen werden. Weil die Gerüche, bevor sie zum Großhirn gelangen, den Umweg über das limbische System machen, können sie im Menschen ganz alte und tiefsitzende Gefühle wecken, und ohne dass es uns bewusst wird, rufen manche Düfte – z.B. der genannte Kaffeeduft oder auch der Duft von Heu und Blumen –, gute Laune hervor; und umgekehrt sinkt die Laune, wenn man beispielsweise am Arbeitsplatz ständig unangenehme Gerüche wahrnehmen muss. Das komplexe Riechsystem ist in Bild 3.1-3 dargestellt.

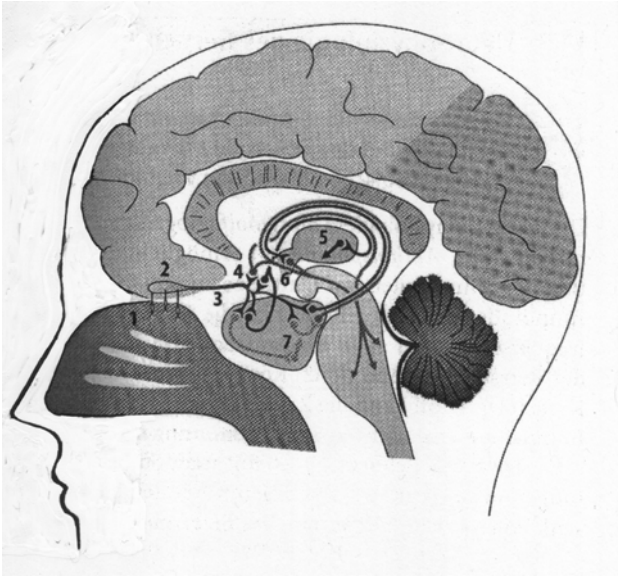

Bild 3.1-3: Das Riechsystem mit seinem primären und sekundären Bahnen zu anderen Hirnregionen. Die Riechsinneszellen (1) bilden Synapsen an den dendritischen Ausläufern der Mitralzellen (2). Die Nervenfortsätze der Mitralzellen ziehen als Tractus olfactorius (3) zu tieferen Gehirnregionen. Das Riechsystem hat direkte Verbindungen über das Riechhirn zum Thalamus (5) und von dort zum Neocortex sowie zum Limbischen System (Amygdala und Hippocampus, (7) und zu vegetativen Kernen des Hypothala-mus (6) (Schmidt et al., 2000).

In Bild 3.1-4 wird die Vergrößerung der Zilien mit dem Prozess der Umwandlung der chemischen Duftreize in elektrische Signale dargestellt. Die Umsetzung eines Umweltreizes in ein elektrisches Signal wird Transduktion genannt.

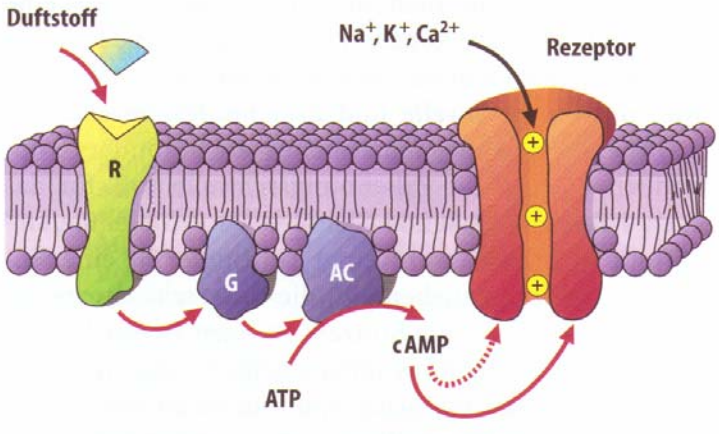

Bild 3.1-4: Schematische Darstellung der Transduktionskaskade (Schmidt et al., 2000)

Der Prozess der Umsetzung von Umweltreizen in neuronale Signale beruht darauf, dass die Membranen der Sinnenzellen ebenso wie diejenigen der Nervenzellen elektrisch geladen sind. Sie weisen ein Ruhepotential auf, das im Innern der Zelle gegenüber dem Außenraum negativ geladen ist.

Durch das sog. „Andocken“ von Geruchsmolekülen in bestimmten „Gruben“ eines Rezeptormoleküls auf der Rezeptoroberfläche findet eine Veränderung der Membranladungseigenschaften und damit der Ionenleitfähigkeit statt. Dies löst eine Kaskade von chemischen Prozessen aus. Ein G-Protein (G) aktiviert das Enzym (AC Adenylatcyclase), das wiederum die Konzentration des Botenstoffes cAMP (**c**yklisches **A**denosin**m**ono**p**hosphat) in der Zelle erhöht. Die cAMP-Moleküle öffnen Kationenkanäle in der Zellmembran. Das Einströmen von Kationen (Na^+, K^+, Ca^{2+}) durch diesen Kanal in die Zellen ruft eine Veränderung des Membranpotentials hervor.

3.2 Psychophysiologische Grundlagen

Rezeptoren haben die Aufgabe, einen Reiz in neuronale Erregung umzuwandeln. Der äußere Reiz wird also zuerst durch den olfaktorischen Rezeptor in ein elektrisches Signal transformiert und über die afferenten Nervenbahnen zum Riechzentrum geleitet. Das zum Zentralnervensystem geleitete Signal führt zu Sinneseindrücken und wird in Beziehung zu unserer Erfahrung und früherem Erleben wahrgenommen. Das Gehirn steht vor der Aufgabe, die von den Sinnesorganen kommenden Erregungen zu interpretieren. Wie andere Wahrnehmungen auch, ist die geruchliche Wahrnehmung sehr komplex. Erst im Zusammenspiel mit anderen Hirnregionen (Thalamus, limbisches System) erkennt das Gehirn den Geruch. Durch den Geruchssinn werden andere Funktionskreise des Menschen beeinflusst. So gibt es durch die enge Bindung an das limbische System eine stark emotionale Komponente der Geruchswahrnehmung. Das limbische System sorgt für eine gefühlsmäßige Beurteilung der Wahrnehmung. Die allgemeine Funktion des limbischen Systems besteht in der Bewertung dessen, was das Gehirn tut. Dies geschieht einerseits nach den Grundkriterien „Lust“ und „Unlust“ und nach Kriterien, die davon abgeleitet sind. Das Resultat dieser Bewertung bleibt im Gedächtnissystem hängen und ist damit untrennbar verbunden, denn jede Bewertung geschieht aufgrund des Gedächtnisses. Umgekehrt ist Gedächtnis nicht ohne Bewertung möglich, denn das „Abspeichern“ von Gedächtnisinhalten geschieht aufgrund früherer Erfahrungen und Bewertungen und des gerade anliegenden emotionalen Zustandes. Aus der Wahrnehmung können wir dann erst eine Empfindung ableiten, die uns veranlasst, unsere Handlungen und Absichten an die soziale Umgebung zu ändern (Fischer et. al, 1998; Schmidt, 2001; G. Roth, 1998).

Die Wahrnehmung ist subjektiv, da beim Wahrnehmungsvorgang die persönlich erfahrenen und erlebten Lernvorgänge eine wichtige Rolle spielen. Um die Empfindungen zu quantifizieren ist es daher erforderlich, die physikochemische Welt der Reize mit der subjektiven Welt der Wahrnehmungen in Beziehung zu setzen. Dieses Forschungsgebiet, das einerseits als ein Teilgebiet der Sinnesphysiologie und andererseits als ein Teil der Wahrnehmungspsychologie aufgefasst werden kann, wird Psychophysik genannt (Handwerker, 1993).

Die einfachste Form einer Quantifizierung von Geruchsempfindung ist die Messung der Geruchsschwelle. Unter Geruchsschwelle kann man die Wahrnehmungsschwelle und die Erkennungsschwelle verstehen. Da biologische Systeme in ihrer Reizbeantwortung variabel sind, werden Schwellen im

allgemeinen meist statistisch bestimmt. Die Wahrnehmungsschwelle entspricht derjenigen Geruchsstoffkonzentration, die in 50% der Reizdarbietungen zu einem Geruchsreiz führt. Wenn man in 50% der Reizdarbietungen die Geruchsqualität bzw. den Geruch verursachenden Stoff erkennt, wird diese Geruchsstoffträgerkonzentration als Erkennungsschwelle bezeichnet. Nach diesem Messansatz können individuelle Geruchsschwellen für eine Einzelperson oder kollektive Geruchsschwellen für eine Gruppe erhoben werden (Fischer et. al, 1998). Die individuelle Geruchsschwelle beinhaltet sowohl Streuungen innerhalb einer Messreihe als auch zwischen verschiedenen Messzeitpunkten. Faktoren wie Hormonstatus (LeMagnen, 1952), Drogenkonsum (Alkohol (Engen et. al, 1975), Kokain (Douek, 1974)) und Altersabbau (Schiffmann et. al, 1976) können die intraindividuelle olfaktorische Sensibilität verändern. Die interindividuelle Variation der olfaktorischen Sensibilität ist offenbar ebenfalls beträchtlich. Über die Ursachen ist jedoch wenig bekannt (Burdach, 1988). Die Geruchswahrnehmung ist auch abhängig vom thermischen Zustand der Luft (Fang, 1995, Böttcher, 2003). Nach Experimenten nahm die geruchliche Akzeptanz (über die Akzeptanzmethode siehe Kap. 4) allein bei Enthalpieerhöhung ab, obwohl die zu bewertende Luft keine Geruchsstoffe oder konstante Geruchsträgerkonzentration enthielt. Wegen vieler Einflussfaktoren ermöglicht nur die kollektive Geruchsschwelle Rückschlüsse auf Geruchsempfindungen in der Grundgesamtheit. Man geht dabei natürlich davon aus, dass das Probandenkollektiv für die Geruchsempfindungen repräsentativ ist.

Der zwischen Reiz- und Empfindungsstärke bestehende Zusammenhang für eine Probandengruppe ist nicht linear. Unter der Empfindungsstärke kann man hier einen Punkt, der als ein arithmetisches Mittel aus einer Vielzahl von Messungen an einem Probanden oder an einer Gruppe von Individuen abgeleitet wird, verstehen, da eine Geruchsschwelle keine exakte, rein substanzabhängige Konstante ist. Im jedem Reizstärkebereich ergibt sich für eine Probandengruppe eine S-förmige psychometrische Funktion, die dem Integral einer Gauß-Zufallsverteilung entspricht (Köster, 1975; Thiele, 1982). Auf dieser Kurve wird der Punkt C_G als Schwelle definiert, wo bei 50% der Beurteilungen gerade noch ein Geruch wahrgenommen wird (siehe Bild 3.2-1).

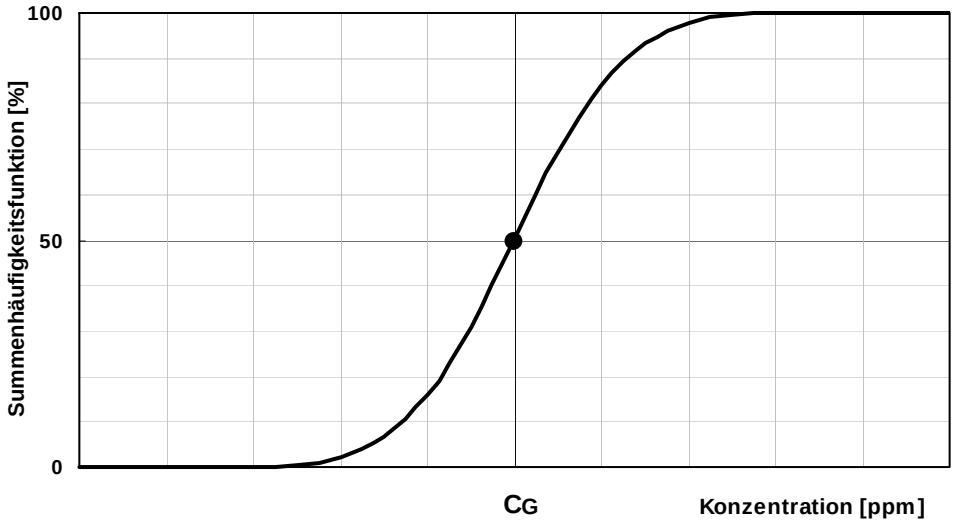

Bild 3.2-1: Lage der Geruchsschwellen (50-Perzentil) für einen Geruchsstoff

Das Weber-Fechner Gesetz

Die Form des Zusammenhangs der Reizwirkung und der Empfindungsstärke kann durch zwei alternative Gleichungen beschrieben werden: entweder durch das Weber-Fechner-Gesetz oder durch die Potenzfunktion nach Stevens.

Die Wahrnehmung der Sinnesorgane wurde Mitte des 19. Jahrhunderts von E. H. Weber (1850) untersucht. Zu den Sinneswahrnehmungen gehört auch das Geruchsempfinden. Er stellt bei seinen Versuchen fest, dass die Reizstärke R_1 um einen bestimmten Bruchteil des Ausgangsreizes ΔR ansteigen muss, damit man die Veränderung der Reizstärke wahrnehmen kann.

Er legte den sogenannten Weber-Quotienten fest:

$$c = \frac{(R_2 - R_1)}{R_1} = \frac{\Delta R}{R_1} \qquad \text{(Gl. 3.2-1)}$$

mit c: Weber-Quotient

R_1: Ausgangsreiz

R_2: Reiz zum Merken des Reizunterschiedes im Vergleich zum Ausgangsreiz

ΔR: Reizzuwachs

Dieses Gesetz gilt jedoch nicht für sehr schwache Reize wenig oberhalb der Wahrnehmungsschwelle.

Die Unterschiedschwelle, also der Faktor, mit dem eine vorgegebene Reizintensität multipliziert werden muss, um eine vom ursprünglichen Intensitätseindruck abweichende Empfindung hervorzurufen (Weberscher Quotient), wird in der Literatur meist mit etwa 0,25 angegeben (Stone & Bosley, 1965); d. h. es bedarf eines Reizzuwachs von etwa 25%, um einen spürbaren Reizunterschied auszulösen. Je nach Sinnesmodalität schwankt der Weber-Quotient: z.B. für Lautstärken (0,016) und für Tonhöhen (0,003) (Burdach, 1988).

Der Zusammenhang von Weber wurde von G.T. Fechner (1860) weiterentwickelt. Er ermittelte ein allgemeines Gesetz zwischen Reizstärke und Reizempfindung. Er setzt den eben wahrnehmbaren Reizunterschied, d.h. den Reizzuwachs, als die Grundeinheit der Empfindungsstärken an und ermittelte die Beziehung zwischen Empfindungsstärke und Reizstärke durch eine Integration über den Weber-Quotienten $\Delta R/R$. Man erhält die Fechner´sche psychophysische Beziehung bzw. das Weber-Fechner-Gesetz.

$$E = k \cdot \log\left(\frac{R}{R_0}\right) \qquad \text{(Gl. 3.2-2)}$$

mit k: Weber-Fechner-Koeffizient
E: Empfindungsstärke
R: Reizstärke
R_0: Reizstärke an der Geruchsschwelle

Wird der Maßstab für die Reizstärke logarithmisch gewählt, erhält man einen linearen Anstieg der Empfindungsstärke.

Die Potenzfunktion nach Stevens

Fechner setzte für seine Formel voraus, dass das Verhältnis von Reizzuwachs zu Grundreiz über den gesamten Intensitätsbereich gleich bleibt. Das wurde in den sechziger Jahren von Stevens kritisiert. Stevens führte seine Experimente auf der Basis einer Verhältnisskalierung durch. Die Probanden sollten dabei angeben, wie

stark ein Geruchsreiz gegenüber einem Vergleichsreiz empfunden wird, z. B. doppelt so stark wie der Vergleichsreiz, halb so stark wie der Vergleichsreiz. Hierbei machen die Probanden direkte Angaben über die subjektive Intensität ihrer Empfindungen. Stevens ermittelte aus den Messergebnissen eine Potenzfunktion. Diese Funktion wird auch Stevens-Potenzfunktion genannt.

$$E = k \cdot (R - R_0)^n \qquad \text{(Gl. 3.2-3)}$$

mit k: Konstante
E: Empfindungsstärke
R: Reizstärke
R_0: Reizstärke an der Geruchsschwelle
n: Exponent

Die Art der quantitativen Beziehung zwischen Reiz- und Empfindungsgröße hängt besonders von der Skalierungstechnik ab (VDI, 1992). Der Unterschied des Zusammenhangs zwischen Reiz- und Empfindungsgröße nach Stevens (Gl. 3.2-3) und nach Fechner (3.2-2) entsteht durch die verschiedenen angewendeten Skalen.

In bezug auf den Geruchssinn, liegt der Exponent n für die meisten Geruchsstoffe im Bereich von 0,2 bis 0,7, ist also kleiner als 1. Der Exponent kann jedoch in Ausnahmefällen auch oberhalb von 1,0 liegen (Berglund et. al, 1971; Laffort & Dravnieks, 1973). Das bedeutet, dass bei einer Reduzierung der Geruchslast, der empfundene Geruch nicht in demselben Maße abnimmt.

Adaptation

Wenn wir schlechten Gerüchen dauerhaft ausgesetzt sind, dann kommt es zur Adaptation, d.h. zu einer allmählichen Verminderung der Empfindungsintensität. Daher kann man sich auch an ganz üble Gerüche gewöhnen, man registriert sie nach einiger Zeit sogar kaum noch. Die empfundene Intensität erreicht nur etwa 25 – 40% der Ausgangsintensität (Fruhstorfer, 1994). Die Adaptation hängt im wesentlichen von der Beschaffenheit des Riechstoffes, seiner Konzentration und der Dauer der Reizdarbietung ab. In Bild 3.2-2 sind zeitlicher Verlauf und Ausprägung der Adaptationsfunktion für Schwefelwasserstoff H_2S dargestellt.

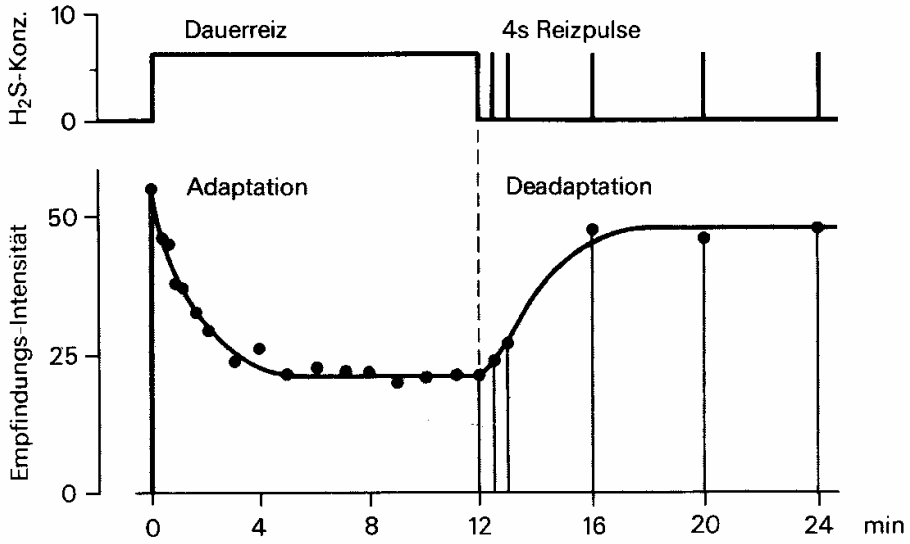

Bild 3.2-2: Adaptationsverlauf bei Dauerreizung mit Schwefelwasserstoff (6.4 ppm). Oben sind die Stimuli, unten die von vier Probanden in je 10 Versuchen abgegebenen Empfindungsintensitäten dargestellt (Zimmermann, 1980)

Die neurophysiologischen Prozesse der olfaktorischen Adaptationsvorgänge sind noch weitgehend unbekannt. Nach Burdach (1988) ist jedoch gesichert, dass sowohl periphere, also auf der Ebene der Rezeptoren, als auch zentrale, d.h. im Bereich des Zentralnervensystems ablaufende Prozesse an der Steuerung der Adaptation beteiligt sind.

3.3 Statistische Grundlagen

Im Alltag erfassen wir einen Zusammenhang oder einen Unterschied mit Hilfe von Sachkenntnis und nach dem sogenannten „Eindruck“. Wir können damit eine Reihe von Fragen stellen bzw. aus beobachteten Erscheinungen herleiten wie z.B. folgende: Wie viele Personen sollte man vor einer Wahl befragen, um ein ungefähres Bild vom Wahlergebnis zu erhalten? Ist die Anzahl der Nichtraucher nach einer Aufklärungskampagne gestiegen? In der Stadt sind weibliche Personen besonders häufig berufstätig. Die Anzahl einnässender Kinder hat sich nach mehrfachem Konditionierungstraining geändert. Die geruchliche Wahrnehmungsfähigkeit des Menschen kann im allgemeinen durch ein Training erhöht werden.

Um qualitative Aussagen zu bekommen oder zu behaupten sind empirische Untersuchungen, die zur Erhebung von quantitativen Daten notwendig sind, unvermeidbar, da ohne vorliegende quantitative Daten das Beantworten bzw. das Bestätigen solcher Aussagen unmöglich ist. Liegen quantitative Informationen über ein Probandenkollektiv vor, erleichtern die folgenden Bearbeitungen der Messwerte die Interpretation der im Probandenkollektiv angetroffenen Merkmalsverteilungen:

- die tabellarische und graphische Darstellung der Daten
- Maße der zentralen Tendenz (z.B. der Mittelwert), die die Messwerte am besten charakterisieren
- Maße der Streuung der Messdaten, die die Unterschiedlichkeit der Messdaten kennzeichnen.

Die statistischen Methoden zur tabellarischen und graphischen Beschreibung der Messdaten oder zur Ermittlung der Kennwerte (z.B. des Mittelwertes oder der Standardabweichung) werden zusammenfassend als deskriptive Statistik bezeichnet. Dagegen versteht man unter der Inferenzstatistik die quantitative Analysetechnik, mit der auf Grund empirischer Daten Aussagen über die Richtigkeit von Hypothesen formuliert werden können. Die Inferenzstatistik wird oft auch schließende (beurteilende) Statistik genannt (J. Bortz, 1985).

3.3.1 Tabellarische Darstellung der Messdaten

Nehmen wir ein Beispiel, damit wir die deskriptive Statistik verständlich darstellen können: Ein Probandenkollektiv, das aus 30 Personen besteht, soll den Geruch eines Raumes nach der in Bild 3.3-1 dargestellten Frage bestimmen.

„Bitte beurteilen Sie die Raumluft auf der Skala von -10 bis +10 !“

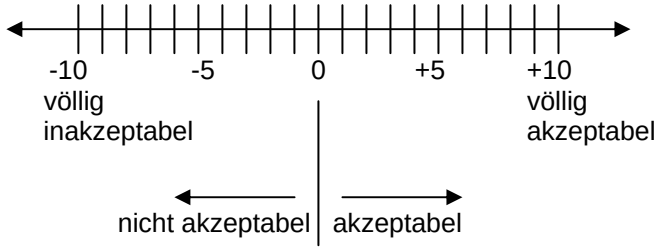

Bild 3.3-1: Die 20-Punkt-Skala

Die Personen empfinden den physikalisch und chemisch gleichen Raumgeruch nicht einheitlich, sondern unterschiedlich. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass größere individuelle Unterschiede der Wahrnehmungsfähigkeit eine objektive Bewertung von Gerüchen erschweren. Ihre Geruchseindrücke werden durch unterschiedliche Akzeptanzen ausgedrückt. Man kann daraus eine Akzeptanzliste gewinnen (siehe Tab. 3.3-1). Diese Liste wird oft als eine Urliste bezeichnet, da sie später zur tabellarischen Aufbereitung des Materials verwendet wird.

Probanden-Nummer	Bewertete Akzeptanz	Probanden-Nummer	Bewertete Akzeptanz	Probanden-Nummer	Bewertete Akzeptanz
1	-1	11	1	21	7
2	-8	12	3	22	5
3	-2	13	0,1	23	1
4	1	14	2	24	-1
5	-0,3	15	-2	25	0,4
6	5	16	-0,2	26	4
7	-1	17	1	27	8
8	1	18	-9	28	4
9	-7	19	-3	29	-2
10	3	20	-4	30	4

Tabelle 3.3-1: Urliste der Akzeptanzbestimmung

Um die Verteilungseigenschaften der Bestimmung besser zu veranschaulichen, werden die individuellen Messwerte nach der Reihenfolge des absteigenden oder aufsteigenden Akzeptanzwertes eingeteilt und in Kategorien bzw. Intervalle zusammengefasst. Hierbei wird die Urliste nach Festlegung der Kategorienbreiten in eine zusammenfassende Strichliste übergeführt. Die Akzeptanzen werden einfach nacheinander geordnet, ohne die Zugehörigkeit einer Bewertung zu einem Probanden zu kennzeichnen. Hierauf kann verzichtet werden, da wir lediglich an der Merkmalsverteilung im gesamten Kollektiv und nicht an individuellen Daten interessiert sind. Durch Auszählung der Striche erhalten wir nun die Häufigkeiten für die einzelnen Kategorien.

(1)	(2)	(3)	(4)
Intervall	Ak Intervallmitte	Strichliste	Besetzungszahl (Häufigkeit) [dimensionslos]
9,5 < Ak ≤ 10,0	10		0
8,5 < Ak ≤ 9,5	9		0
7,5 < Ak ≤ 8,5	8	I	1
6,5 < Ak ≤ 7,5	7	I	1
5,5 < Ak ≤ 6,5	6		0
4,5 < Ak ≤ 5,5	5	II	2
3,5 < Ak ≤ 4,5	4	III	3
2,5 < Ak ≤ 3,5	3	II	2
1,5 < Ak ≤ 2,5	2	I	1
0,5 < Ak ≤ 1,5	1	IIIII	5
-0,5 < Ak ≤ 0,5	0	IIII	4
-1,5 < Ak ≤ -0,5	-1	III	3
-2,5 < Ak ≤ -1,5	-2	III	3
-3,5 < Ak ≤ -2,5	-3	I	1
-4,5 < Ak ≤ -3,5	-4	I	1
-5,5 < Ak ≤ -4,5	-5		0
-6,5 < Ak ≤ -5,5	-6		0
-7,5 < Ak ≤ -6,5	-7	I	1
-8,5 < Ak ≤ -7,5	-8	I	1
-9,5 < Ak ≤ -8,5	-9	I	1
-10,0 < Ak ≤ -9,5	-10		0
Insgesamt		30	30

Tabelle 3.3-2: Tabellarische Darstellung der Häufigkeit

Mit der tabellarischen Darstellung der Häufigkeitsverteilung kann man die Verteilung der Akzeptanzen des zu bestimmenden Raumes am einfachsten veranschaulichen. Ausgehend von der Urliste können weitere Verteilungseigenschaften (z.B. eine kumulierte Häufigkeitsverteilung, eine Prozentwertverteilung und/oder eine kumulierte Prozentwertverteilung), die uns ein anderes anschauliches Bild der Verteilung liefern können, ermittelt werden.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Ak (Intervallmitte)	Besetzungszahl (Häufigkeit) [dimensionslos]	Aufsummierte Besetzungszahl [dimensionslos]	Prozentwert [%]	Häufigkeitssumme [%]
10	0	0	0,0	0,0
9	0	0	0,0	0,0
8	1	1	3,3	3,3
7	1	2	3,3	6,6
6	0	2	0,0	6,6
5	2	4	6,7	13,3
4	3	7	10,0	23,3
3	2	9	6,7	30,0
2	1	10	3,3	33,3
1	5	15	16,7	50,0
0	4	19	13,3	63,3
-1	3	22	10,0	73,3
-2	3	25	10,0	83,3
-3	1	26	3,3	86,7
-4	1	27	3,3	90,0
-5	0	27	0,0	90,0
-6	0	27	0,0	90,0
-7	1	28	3,3	93,3
-8	1	29	3,3	96,7
-9	1	30	3,3	100,0
-10	0	30	0,0	100,0

Tabelle 3.3-3: Summenhäufigkeit und prozentuale Darstellung der Verteilung

Um zu kontrollieren, ob bei der Aufstellung der tabellarischen Darstellung alle Messwerte berücksichtigt wurden, empfiehlt es sich, die Häufigkeiten (Spalte 2 in Tab. 3.3-3) sukzessiv aufzuaddieren, wobei die Summe den Wert n = Kollektivumfang ergeben muss. Die sukzessiv summierten Häufigkeiten werden als kumulierte Häufigkeitsverteilung (Spalte 3 in Tab. 3.3-3) bezeichnet. Sollen unterschiedlich große Kollektive hinsichtlich ihrer Akzeptanzverteilung verglichen,

werden bzw. die Akzeptanzverteilung in einem Kollektiv leichter überschaubar gemacht werden, können die absoluten Häufigkeiten der einzelnen Akzeptanzen als Prozentwerte (Spalte 4 und 5 in Tab. 3.3-3) ausgedrückt werden.

Gegen die Kategorienwahl in Tab. 3.3-2 könnte man einwenden, dass die Kategorien nicht die geplante Breite von Ak = 1, sondern von Ak = 0,99... aufweisen. Dies ist jedoch nur scheinbar der Fall, denn das untersuchte Material „Akzeptanz“ ist stetig verteilt, so dass die Kategoriengrenzen genau genommen durch die Werte 9,5-8,4 $\overline{9}$ usw. zu kennzeichnen gewesen wären. Da unsere Messungen jedoch nur eine Genauigkeit von einer Nachkommastelle aufweisen, können alle Messwerte durch die in Tab. 3.3-2 vorgenommene Kennzeichnung der Kategoriengrenzen eindeutig zugeordnet werden. Wir unterscheiden deshalb zwischen scheinbaren Kategoriengrenzen, die eine zweifelsfreie Zuordnung aller Messwerte in Abhängigkeit von der Messgenauigkeit gestatten, und wahren Kategoriengrenzen, die die Kategorienbreiten mathematisch exakt wiedergeben.

3.3.2 Graphische Darstellung der Messdaten

Eine graphische Darstellung einer Häufigkeitsverteilung in Form eines Polygons oder eines Histogramms ermöglicht es, die Verteilungsform noch anschaulicher zu beschreiben. Während das Polygon zur graphischen Darstellung einer stetigen Variablen geeignet ist, sollte das Histogramm der graphischen Darstellung einer diskreten Variablen vorbehalten bleiben. Die Häufigkeitsverteilung in Tabelle 3.3-2 wird in einem Histogramm graphisch dargestellt (siehe Bild 3.3-2).

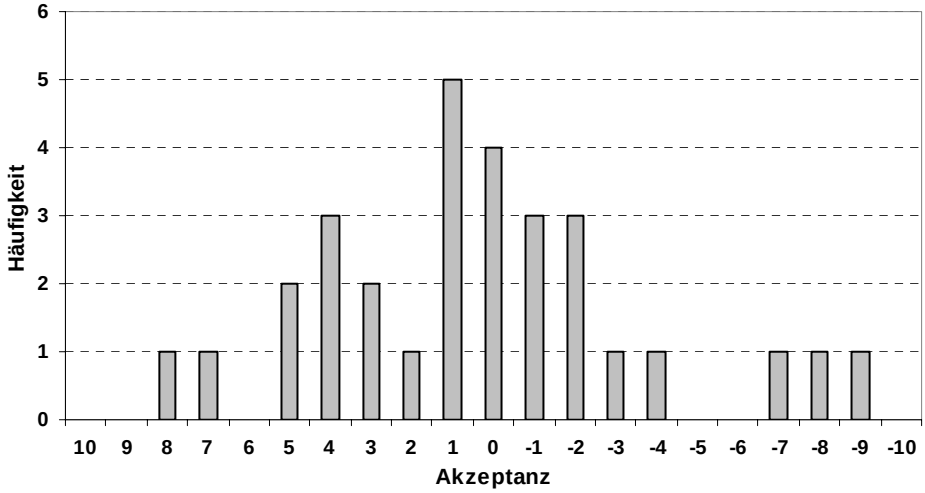

Bild 3.3-2: Graphische Darstellung der Häufigkeit der Akzeptanz

Die prozentuale Summenhäufigkeit wird ebenfalls zur Veranschaulichung graphisch dargestellt (siehe Bild 3.3-3). Die gefüllten Quadrate bedeuten die sukzessiv summierten Prozentsätze (Spalte 5 in Tab. 3.3-3) bei jeder Kategorienmitte. Dabei werden die benachbarten Quadrate mit Geraden verbunden, um den Kurvenverlauf noch anschaulicher darzustellen.

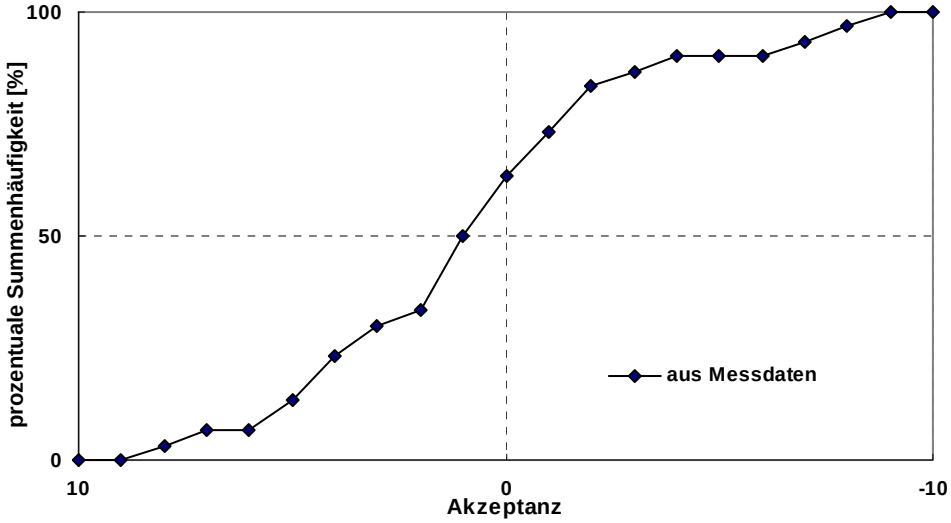

Bild 3.3-3: Prozentuale Summenhäufigkeitsfunktion

3.3.3 Statistische Kennwerte

Während eine tabellarische oder eine graphische Darstellung über die gesamte Verteilung eines Ausprägungsmerkmals in einem Kollektiv informiert, geben die statistischen Kennwerte summarisch Auskunft über spezielle Eigenschaften der Merkmalsverteilung. Am meisten interessieren wir uns hierbei für zwei Maße: die Maße der zentralen Tendenz und die Dispersionsmaße. Repräsentieren die zentralen Maße alle Messwerte möglichst typisch, so haben die Dispersionsmaße die Funktion, die Unterschiedlichkeit oder Variabilität der Ausprägungen eines Merkmals zu kennzeichnen.

3.3.3.1 Maße der zentralen Tendenz

Wie in Bild 3.3-2 dargestellt ist, liegen die Häufigkeiten der Akzeptanzbestimmung nicht bei einem Wert, sondern sie verteilen sich über einen breiten Bereich. Wir können nun fragen, durch welchen Wert die gesamte Verteilung am besten repräsentiert wird. Um diese Frage eindeutig zu beantworten, muss zuerst erklärt

werden, was unter „am besten repräsentiert“ zu verstehen ist. Wir suchen deshalb zunächst genauer nach demjenigen Wert, der die Merkmalsausprägung einer zufällig ausgewählten Person A am besten wiedergibt.

Der Modalwert D (Dichtemittel)

Ist man daran interessiert, dass der gesuchte Wert mit dem Wert der Person A mit möglichst großer Wahrscheinlichkeit identisch ist, liegt es auf der Hand, denjenigen Wert zu wählen, der im Kollektiv am häufigsten vorkommt. Bei eingipfligen Verteilungen ist der Modalwert derjenige Wert, an dem die Dichtefunktion einer stetigen Verteilung maximal wird. Bei diskreter Verteilung ist es der Wert mit der größten Häufigkeit. Der Wert, der eine Verteilung in diesem Sinne am besten repräsentiert, wird als Modalwert bezeichnet. Bei klassierten Daten ist er als Klassenmitte der am stärksten besetzten Klasse definiert. Da bei unserem Beispiel die Akzeptanzbestimmung von Ak = 1 am häufigsten vorgekommen ist, lautet der Modalwert D = 1.

Der Medianwert $\tilde{x}$

Ein anderes Kriterium für die Bestimmung der besten Repräsentation einer Verteilung könnte erfordern, dass die Summe der absoluten Beträge der Abweichungen (d.h. der Abweichungen ohne Berücksichtigung des Vorzeichens) des gesuchten Wertes von einzelnen Werten ein Minimum ergibt. Das bedeutet, dass die absolute Abweichung des gesuchten Wertes vom Wert der Person A möglichst klein sein soll. Vom gesuchten Wert weichen alle übrigen Werte im Durchschnitt am wenigsten ab. Diese Eigenschaft hat derjenige Wert, der die Verteilung in zwei gleich große Hälften teilt, so dass jeder Teil 50% der Verteilung enthält. Liegen über einem Wert genauso viel Fälle wie unter dem Wert, so wird dieser Wert als Median bezeichnet. Wenn man die Einzelwerte nach der Größe in eine Reihe geordnet, halbiert der Median die Reihe. Bei unserem Beispiel muss der Median zwischen dem 15. und 16. Wert, also zwischen Ak = 0,4 und Ak = 1, liegen, da das Probandenkollektiv aus 30 Probanden (Gerade Zahl) besteht. Dann bildet das Mittel der beiden Werte den Median: $\tilde{x}$ = (1+0,4)/2 = 0,7.

Das Arithmetische Mittel μ

Gibt der Median die Information über möglichst kleinste summarische Abweichungsbeträge vom Wert einer Person A, so hat das arithmetische Mittel die

Eigenschaft, dass alle übrigen Werte in der Weise von ihm abweichen, dass die Summe der quadrierten Abweichungen ein Minimum ergibt. Beim Median als repräsentativem Schätzwert einer Person A können große Fehler mit gleicher Wahrscheinlichkeit auftreten wie kleine Fehler. Wir fragen nun, wie man große Schätzfehler möglichst vermeiden kann. Durch Quadrierung der Abweichung werden größere Abweichungen stärker „gewichtet“ als kleinere Abweichungen. Damit werden große Schätzfehler möglichst vermieden. Das arithmetische Mittel wird berechnet, indem die Summe aller Werte durch die Anzahl aller Werte dividiert wird. Die Gleichung lautet:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \qquad \text{(Gl. 3.3-1)}$$

mit x_i : Einzelne Aussagen der Probanden
n : Anzahl der Probanden im Kollektiv

Das arithmetische Mittel ist als Indikator für die zentrale Tendenz einer Verteilung im Vergleich zum Modalwert und zum Medianwert am informationsreichsten, da es alle einzelnen Werte berücksichtigt. Das arithmetische Mittel lautet bei unserem Beispiel dann μ = 0,33.

Die größte Abweichung beträgt 9,7 (= |(-9) – 0,7 |), wenn man bei unserem Beispiel (siehe Tabelle 3.3-2) den Median als den repräsentativen Wert nimmt. Dagegen beträgt die größte Abweichung 9,33 (= |(-9) – 0,33 |), wenn man das arithmetische Mittel als den Mittelwert der Verteilung nimmt.

3.3.3.2 Dispersionsmaße

Wie sich die gesamte Verteilung am besten durch einen Wert repräsentieren lässt, wurde bereits im Zusammenhang mit den Maßen der zentralen Tendenz erörtert. Ähneln sich 2 Verteilungen hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz, können sie dennoch auf Grund unterschiedlicher Streuungen (Dispersionen) der einzelnen Werte stark voneinander abweichen (siehe Bild 3.3-4).

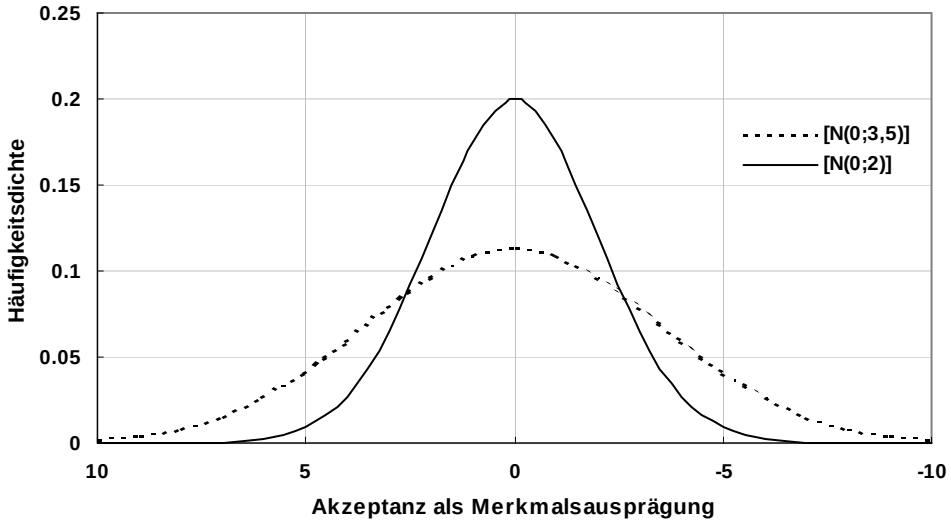

Bild 3.3-4: Verschiedene Häufigkeitsverteilungen durch die unterschiedlichen Streuungen $\sigma_1 = 2$ und $\sigma_2 = 3{,}5$ mit dem gleich großen Mittelwert $\mu = 0$

Die Dispersionsmaße liefern also die ergänzende Information darüber, wie gut (oder schlecht) eine Verteilung durch ein zentrales Tendenzmaß repräsentiert werden kann. Danach ist es einleuchtend, dass ein Maß der zentralen Tendenz die Gesamtverteilung um so schlechter charakterisiert, je unterschiedlicher die Messwerte sind. Die Bezeichnung [N(0;3,5)] in Bild 3.3-4 bedeutet eine Normalverteilung mit dem arithmetischen Mittel $\mu = 0$ und der Standardabweichung $\sigma = 3{,}5$ (näheres siehe in Kap. 4).

Die Spannweite R (engl.=range)

Das einfachste Dispersionsmaß ist die Spannweite. Sie wird ermittelt, indem die Differenz aus dem größten und dem kleinsten Wert gebildet wird:

$$R = x_{max} - x_{min} \qquad \text{(Gl. 3.3-2)}$$

mit x_{max} : der größte Wert unter die einzelnen Aussagen

x_{min} : der kleinste Wert unter die einzelnen aussagen

Interdezilbereich D_i/ Interquartilbereich Q_i

Da die Spannweite bei Auftreten von Extremwerten die Verteilung der übrigen Werte stark übertreibt, kann stattdessen die Streubreite der mittleren 80 % aller

Fälle (Interdezilbereich) oder der mittleren 50 % aller Fälle (Interquartilbereich) bestimmt werden. Hierzu müssen diejenigen Messwerte der Skala gefunden werden, die die unteren und oberen 10 % einer Verteilung (Dezile) bzw. die unteren und oberen 25 % der Verteilung (Quartile) abschneiden. Die Differenz des 9-ten Dezils (D_9) und des 1-ten (D_1) ergibt den Interdezilbereich (D_9 - D_1) und die Differenz zwischen dem 3-ten Quartil (Q_3) und dem 1-ten Quartil (Q_1) den Interquartilbereich (Q_3 – Q_1). Das 5-te Dezil (D_5) und das 2-te Quartil (Q_2) sind der zentrale Wert. Sie entsprechen dem Median, da er den beobachteten Wert angibt, der die Verteilung in zwei gleich große Hälften teilt, so dass jeder Teil 50% der Verteilung enthält.

AD-Streuung (average-deviation)

Wie beim arithmetischen Mittel werden bei der Ermittlung von AD-Streuung die Abweichungen sämtlicher Werten vom arithmetischen Mittel berücksichtigt. Sie ist deswegen informationsreicher als die Streubreiten aller oder einiger Werte. Sie gibt den Durchschnitt der in Absolutbeträgen gemessenen Abweichungen aller Messwerte vom arithmetischen Mittel an.

$$AD = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(\left| x_i - \mu \right| \right)}{n} \qquad \text{(Gl. 3.3-3)}$$

mit x_i : einzelne Aussagen

μ : arithmetisches Mittel aus den einzelnen Aussagen

n : Teilnehmerzahl des Probandenkollektivs

Varianz (σ^2) und Standardabweichung (σ)

Bei der Ermittlung der AD-Streuung werden unterschiedlich große Abweichungen einzelner Werte von der zentralen Tendenz gleich stark gewichtet. Dagegen kann man die Forderung, größeren Abweichungen ein stärkeres Gewicht als kleineren Abweichungen zu geben, dadurch erfüllen, dass die einzelnen Abweichungswerte quadriert werden.

Die Varianz σ^2 wird ermittelt, indem alle quadrierten Abweichungen der einzelnen Messwerte vom arithmetischen Mittel summiert werden und diese Summe durch die Anzahl aller Messwerte dividiert wird.

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \mu)^2}{n} \qquad \text{(Gl. 3.3-4)}$$

mit x_i : einzelne Aussagen

μ : arithmetisches Mittel der einzelnen Aussagen

n : Teilnehmerzahl des Probandenkollektivs.

Im Vergleich mit den bisher besprochenen Dispersionsmaßen (Interquartilbereich, Interdezilbereich, AD-Streuung) kann man einen entscheidenden Nachteil des Varianzmaßes feststellen. Die schon oben erwähnten Dispersionsmaßzahlen haben die gleiche Einheit wie die ursprünglichen Werte. Bei der Varianz hingegen erhalten wir durch die Quadrierung der Einzelabstände ein Maß, dem das Quadrat der ursprünglichen Einheit der Messwerte zugrunde liegt. Die Varianz ist nur schwer interpretierbar. Daher wird die Quadrierung wieder rückgängig gemacht, in dem die Wurzel aus der Varianz berechnet wird. Der positive Wert dieser Wurzel wird als Standardabweichung σ (oder kurz als Streuung) bezeichnet.

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \mu)^2}{n}} \qquad \text{(Gl. 3.3-5)}$$

mit x_i : einzelne Aussagen

μ : arithmetisches Mittel der einzelnen Aussagen

n : Teilnehmerzahl des Probandenkollektivs

Die Standardabweichung ist größer als die AD-Streuung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der Standardabweichung durch die Quadrierung größere Abweichungen überproportional stärker berücksichtigt werden als die kleinere Abweichungen, während die AD-Streuung alle Abweichungen gleich gewichtet. Und es wird durch $\sqrt{n}$ statt n geteilt.

3.3.3.3 Formmaße

Durch die Position des arithmetischen Mittels, des Modalwertes und des Medianwertes in einer Verteilung kann festgestellt werden, wie sich die einzelnen Werte verteilen. Es besteht bei rechtssteilen Verteilungen die Beziehung

arithmetisches Mittel < Medianwert < Modalwert, bei linkssteilen Verteilungen die Beziehung Modalwert < Medianwert < arithmetisches Mittel und bei symmetrischen Verteilungen die Beziehung arithmetisches Mittel = Modalwert = Medianwert.

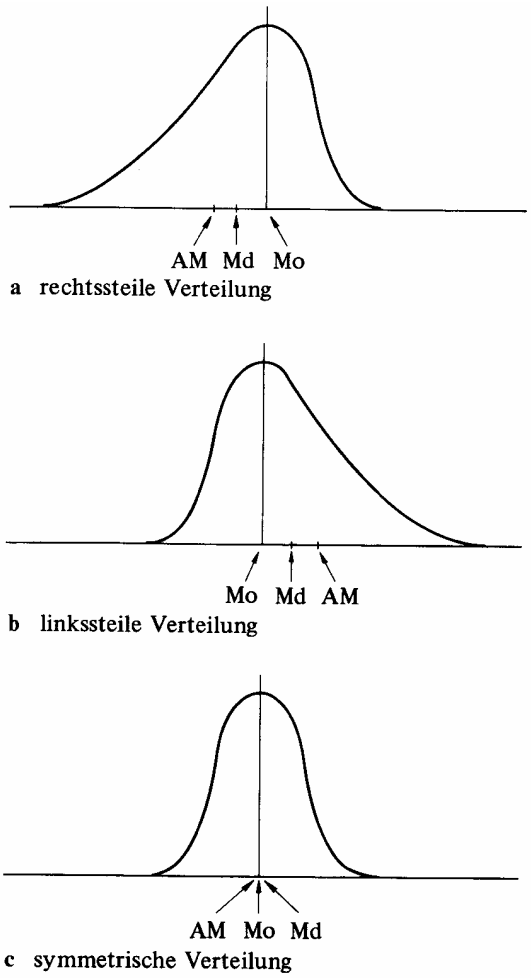

Bild 3.3-5: Arithmetisches Mittel, Modal- und Medianwert bei verschiedenen Verteilungsformen (J. Bortz, 1985)

Da beim in Tab. 3.3-1 angenommenen Beispiel die Beziehung arithmetisches Mittel (μ = 0,33) < Medianwert ($\tilde{x}$ = 0,7) < Modalwert (D = 1) besteht, kann man feststellen, dass das Ausprägungsmerkmal eine rechtssteile Verteilung hat.

Die Schiefe

Die Schiefe (symmetrisch vs. asymmetrisch) einer Verteilung kann durch die Position vom arithmetischen Mittel, Modalwert und Medianwert beschrieben

werden. Eine grobe Abschätzung für die Größe der Schiefe einer Verteilung liefert der folgende Wert:

$$Schiefe\ I = \frac{\mu - \tilde{x}}{\sigma} \qquad \text{(Gl. 3.3-6)}$$

mit $\tilde{x}$: Median

μ : arithmetisches Mittel der einzelnen Aussagen

σ : Standardabweichung

Ist Schiefe < 0, bezeichnen wir die Verteilung als rechtssteil,
ist Schiefe > 0, bezeichnen wir die Verteilung als linkssteil,
ist Schiefe = 0, bezeichnen wir die Verteilung als symmetrisch.

Die Wölbung (Exzess)

Die Wölbung (breitgipflig vs. schmalgipflig) kann ausgehend von den Quartil- (Q_i) bzw. Dezilwerten (D_i) nach folgender Gleichung näherungsweise geschätzt werden:

$$Woelbung = \frac{Q_3 - Q_1}{2(D_9 - D_1)} \qquad \text{(Gl. 3.3-7)}$$

Die Wölbung einer Normalverteilung beträgt 0,263. Je größer die Wölbung einer Verteilung ist, um so breitgipfliger ist ihr Verlauf.

3.3.3.4 Zusammenfassung zur Verteilung

Man kann die eindimensionalen Häufigkeitsverteilungen mit folgenden Maßen charakterisieren:

1. Lokalisationsmaße: Maße für die repräsentative Lage einer Verteilung (arithmetisches Mittel, Median, Modalwert usw.).
2. Dispersions- bzw. Streuungsmaße: Maße, die die Variabilität der Verteilung kennzeichnen (Varianz, Standardabweichung, Spannweite, Variationskoeffizient, Interdezilbereich, Quartilsabstand usw.).
3. Formmaße: Maße, die die Abweichung einer Verteilung von der Normalverteilung charakterisieren (Schiefe, Wölbung usw.).

3.4 Messverfahren der Luftqualität

3.4.1 Das 2-Punkt-Verfahren

Durch eine einfache Fragestellung kann man nützliche Informationen erhalten. Es wird ein Paar von im Alltag nach dem Sprachgebrauch eindeutig zu verstehenden Gegenwörtern z.B. „akzeptabel / inakzeptabel“, „gut / schlecht“, „angenehm / unangenehm“, usw. verwendet. Wegen der dualen Beantwortungsmöglichkeit, entweder dieses oder jenes, wird das System „Dualsystem“ genannt. In Bild 3.4-1 ist ein Dualsystem, das hier als das 2-Punkt-(Skala)-Verfahren bezeichnet wird, dargestellt. Dieses System wurde von Fanger et al. (1983) und Berg Munch et al. (1986) zur Bestimmung der Raumluftqualität verwendet.

„Stellen Sie sich vor, Sie sollten diesen Raum während Ihrer täglichen Arbeit häufig betreten. Würden Sie den Geruch in diesem Raum als akzeptabel beurteilen?“

- ○ ja
- ○ nein

Bild 3.4-1: Fragestellung zur Bestimmung der Luftqualität des Innenraumes

Die Zahl der Personen, die mit „nicht akzeptabel“ gestimmt hatten, wurde bestimmt und durch die Zahl aller befragter Personen dividiert und auf 100 bezogen. Dadurch wird ein Zahlenwert, der als ein Maß für die Luftqualität verstanden werden kann, ermittelt. Dieser Wert wurde als Prozentsatz Unzufriedener (engl.: percentage of dissatisfied) bezeichnet und als Indikator der Luftqualität des Innenraumes herangezogen.

$$PD = \frac{\text{Anzahl der Antworten "nicht akzeptabel"}}{\text{Anzahl aller Antworten}} \cdot 100 \qquad \text{(Gl. 3.4-1)}$$

Zwei neue Einheiten „olf“ und „dezipol“

Fanger (1988) entwickelte ein Verfahren zur Bestimmung der Empfundenen Luftqualität durch Personen und führte zwei neue Einheiten zur systematischen Darstellung und Berechnung der olfaktorischen Größen ein. Mit der Anwendung des 2-Punkt-Verfahrens wurde unter anderem die Akzeptanz der Raumluftqualität in Abhängigkeit vom Zuluftvolumenstrom ermittelt.

Die Versuche fanden in zwei Hörsälen der TU-Dänemark statt. Der Hörsaal war während der Untersuchung voll belegt. Der Volumenstrom der RLT-Anlage wurde variiert, um die Luftqualität im Hörsaal zu verändern. Besucher beurteilten die Akzeptanz und mit Gleichung 3.4-1 wurde der Prozentsatz Unzufriedener ermittelt. Bild 3.4-2 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Zuluftvolumenstrom pro Person und dem Prozentsatz Unzufriedener.

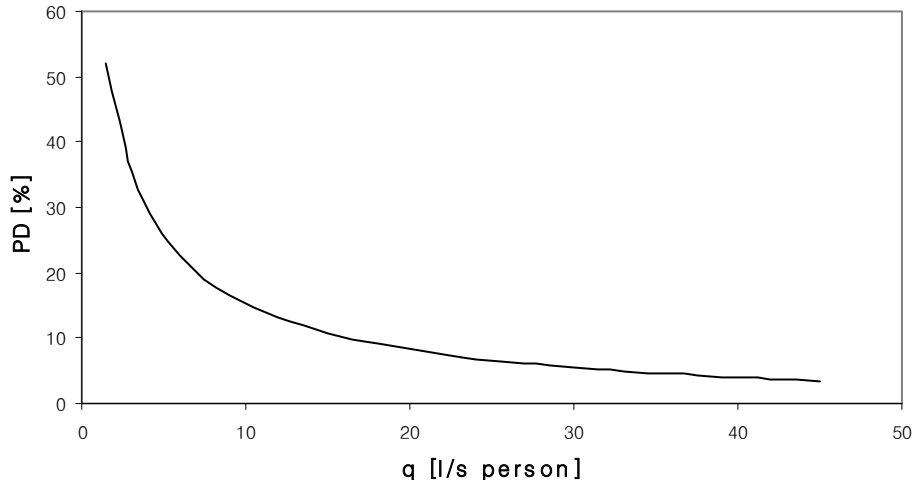

Bild 3.4-2: Prozentsatz Unzufriedener in Abhängigkeit von der personenbezogenen Luftrate in einem Hörsaal nach Fanger

Für diesen Zusammenhang wurde folgende empirische Gleichung gefunden:

$$PD = 395 \cdot \exp(-1{,}83 \cdot q^{0{,}25}) \qquad \text{(Gl. 3.4-2)}$$

mit q : Volumenstrom pro Person in l/(s·Person)

Fanger führte als Basisgröße für die Luftverunreinigungslast die Einheit „olf“ ein. 1 olf quantifiziert dabei die Verunreinigungsmenge, die eine „Standardperson“ abgibt. Unter einer Standardperson versteht man einen entspannt sitzenden Menschen, der normal gekleidet ist und sich im Durchschnitt 0,7 mal pro Tag badet oder duscht.

Für die Konzentration der Luftverunreinigung oder für die „Empfundene Luftqualität“ wurde die zweite neue Einheit „dezipol“ eingeführt. Unter der Einheit 1 dezipol versteht man die Luftqualität, die sich bei Mischung einer Verunreinigungslast von 1 olf und einem Volumenstrom von 10 l/s reiner Luft ergibt.

Handelt es sich um Standardpersonen, entspricht die Empfundene Luftqualität dem zehnfachen Kehrwert des personenbezogenen Luftvolumenstroms in Litern pro Sekunde. Durch die Ermittlung des Kehrwertes des personenbezogenen Luftvolumenstroms kann man daher den Zusammenhang zwischen Prozentsatz Unzufriedener und Empfundener Luftqualität erhalten. Der Zusammenhang ist in Bild 3.4-3 dargestellt.

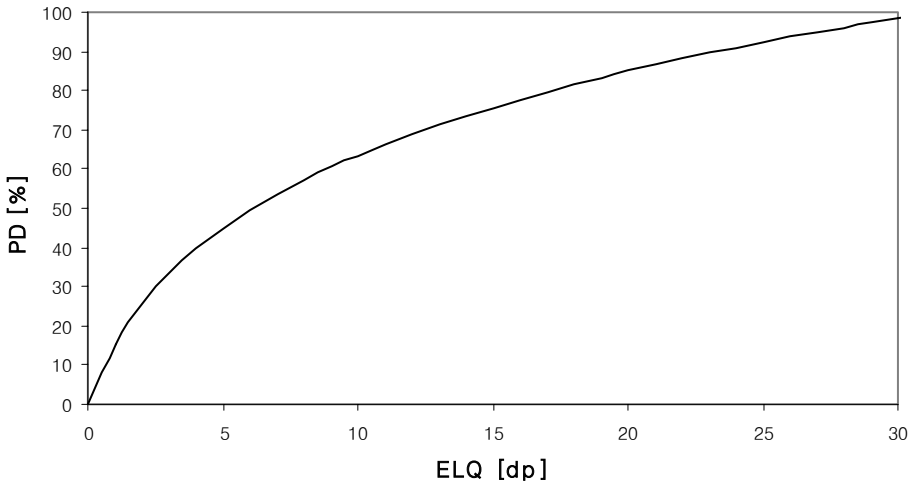

Bild 3.4-3: Zusammenhang zwischen Prozentsatz Unzufriedener (PD) und Empfundener Luftqualität (ELQ)

Damit kann die Gleichung (3.4-2) folgendermaßen umgeformt werden:

$$PD = 395 \cdot \exp(-3{,}25 \cdot ELQ^{-0{,}25}) \qquad \text{(Gl. 3.4-3)}$$

mit ELQ : Empfundene Luftqualität in dezipol.

3.4.2 Das 20-Punkt-Verfahren

Wegen der Antwortalternative „akzeptabel / nicht akzeptabel“ erlaubt das 2-Punkt-Verfahren keine feine Differenzierung der Aussage über die Luftqualität. Beim 20-Punkt-Verfahren wird eine ähnliche Fragestellung verwendet, wie beim 2-Punkt-Verfahren. Allerdings unterscheiden sich die Antwortalternativen, da die Antwort von den Probanden auf einer analogen Skala angegeben werden muss.

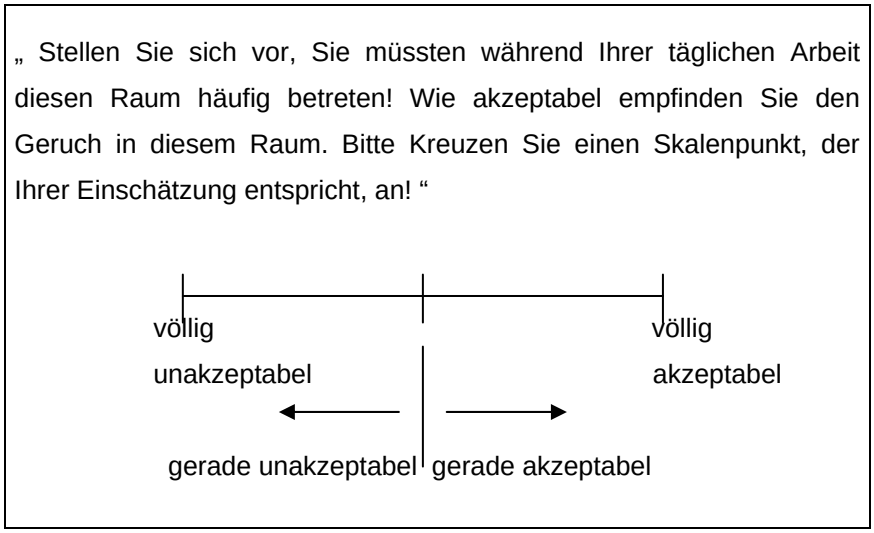

Bild 3.4-4: Stetige Fragestellung zur Bestimmung des Akzeptanzwertes

Während die Akzeptanz der Luft beim 2-Punkt-Verfahren entweder durch völlige Ablehnung oder durch völlige Zustimmung beurteilt wird, bestimmen die Probanden sie beim 20-Punkt-Verfahren durch Ankreuzen auf der oben dargestellten Skala. Sie können die Bewertung gemäß ihrer subjektiven Empfindung differenzieren. Der Abschnitt, auf dem die Probanden den Akzeptanzgrad als Längenvergleich angeben, spiegelt also ihren differenzierten Geruchseindruck wieder.

Zur Auswertung wird der Bewertung „gerade akzeptabel“ bzw. „gerade unakzeptabel“ der Wert Null zugeordnet, „völlig akzeptabel“ erhält den Wert +10, „völlig unakzeptabel“ den Wert -10. Der Abstand zwischen gerade akzeptabel und völlig akzeptabel (und der Abstand zwischen gerade unakzeptabel und völlig unakzeptabel) wird in 10 gleiche Abschnitte unterteilt, so dass an der Position des Kreuzes die Bewertung abgelesen werden kann. Wegen dieser Aufteilung der stetigen Skala in 20 äquidistante Intervalle wird das System als 20-Punkt-(Skala)-Verfahren genannt.

Die Ermittlung des Prozentsatzes Unzufriedener (PD)

Bei vereinfachter Betrachtung der Akzeptanz kann der Prozentsatz Unzufriedener der einzelnen Probanden ermittelt werden. Hierbei wird ein Auswertungsverfahren wie beim 2-Punkt-Verfahren verwendet: Dabei werden die positiven Akzeptanzbestimmungen einfach als ‚akzeptabel' und die negativen Akzeptanzbestimmungen als ‚nicht akzeptabel' betrachtet. Bild 3.4-5 zeigt diese Interpretation der Akzeptanz zur Ermittlung des Prozentsatzes Unzufriedener.

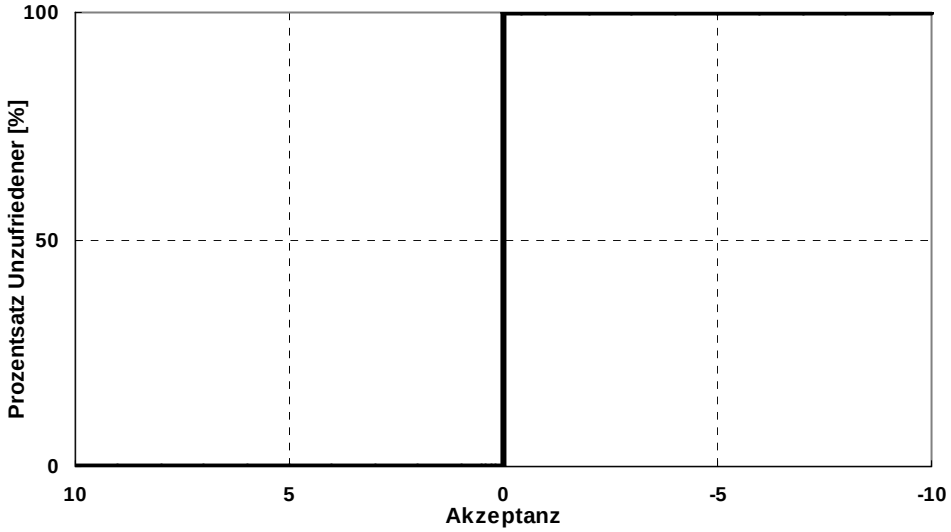

Bild 3.4-5: Vereinfachte Interpretation der Akzeptanz zur Ermittlung des Prozentsatzes Unzufriedener beim 20-Punkt-Verfahren

Zur Ermittlung des Prozentsatzes Unzufriedener wird die Zahl der Personen, die mit der Akzeptanz kleiner als 0 gestimmt haben, summiert und durch die Zahl aller befragter Personen dividiert.

$$PD = \frac{\text{Anzahl der Antworten kleiner als } 0}{\text{Anzahl aller Antworten}} \cdot 100 \qquad \text{(Gl. 3.4-4)}$$

Bildet man die Häufigkeit für jede Akzeptanz, so erhält man für diskrete Werte den Prozentsatz Unzufriedener:

$$PD = \frac{\sum_{-10}^{0} f(Ak_i)}{\sum_{-10}^{10} f(Ak_i)} \cdot 100 \qquad \text{(Gl. 3.4-4´)}$$

mit $f(Ak_i)$: Häufigkeit der klassifizierten Akzeptanz

Die Ermittlung der mittleren Akzeptanz ($\overline{Ak}$)

Anders als beim 2-Punkt-Verfahren kann man beim 20-Punkt-Verfahren eine zusätzliche Information, nämlich die Verteilung der unterschiedlichen Akzeptanzbestimmungen bei einer gegebenen Geruchsstoffkonzentration, ermitteln. Hier muss man zuerst die Frage, welcher Akzeptanzwert als repräsentativ für den unterschiedlich beurteilten Geruchseindruck betrachtet werden soll, stellen. Wie schon in Kap. 3.3 erwähnt ist, ist die Antwort ohne Berücksichtigung der Verteilungsform nicht einfach oder sogar unmöglich. Bei der Berücksichtigung der Verteilungsform ist die Beantwortung nach der Repräsentativität auch sehr schwer, da die konstante Geruchsdarbietung nicht nur interindividuell sondern auch intraindividuell unterschiedlich wahrgenommen wird. Am häufigsten wird die mittlere Akzeptanz (arithmetisches Mittel) ermittelt und diese wird als eine für alle Bestimmungen repräsentative Zahl betrachtet. Das arithmetische Mittel wird wie folgt bestimmt:

$$\overline{Ak} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Ak_i}{n} \qquad \text{(Gl. 3.4-5)}$$

mit Ak_i : einzelne Akzeptanzbestimmungen

Bildet man das Produkt des Skalenwertes mit der Häufigkeit und dividiert durch alle vorkommende Häufigkeiten, so erhält man aus den klassifizierten Akzeptanzen die mittlere Akzeptanz. Die Gleichung lautet dann:

$$\overline{Ak} = \frac{\sum_i Ak_i \cdot f(Ak_i)}{\sum_i f(Ak_i)} \qquad \text{(Gl. 3.4-5´)}$$

mit Ak_i : einzelne Akzeptanzbestimmungen

$f(Ak_i)$: Häufigkeit der klassifizierten Akzeptanz

Der Zusammenhang zwischen Ak und PD

Dank der Differenzierung der Aussage über die Akzeptanz kann man eine Formel für den Zusammenhang zwischen der mittleren Akzeptanz und dem Prozentsatz Unzufriedener ermitteln. Das 20-Punkt-Verfahren ermöglicht also eine Umrechnung der Akzeptanzaussage in einen Prozentsatz Unzufriedener.

Seit der Einführung des 20-Punkt-Verfahren wurden wiederholt die Zusammenhänge zwischen Akzeptanz und Prozentsatz Unzufriedener bestimmt. Bluyssen (1990) untersuchte die Akzeptanz von Azetonkonzentrationen. Sie gab Messwerte für Akzeptanzwerte von +4,2 bis –5,1 an und betrachtete in diesem Bereich die Funktion vereinfachend als linear verlaufend (siehe Bild 3.4-6).

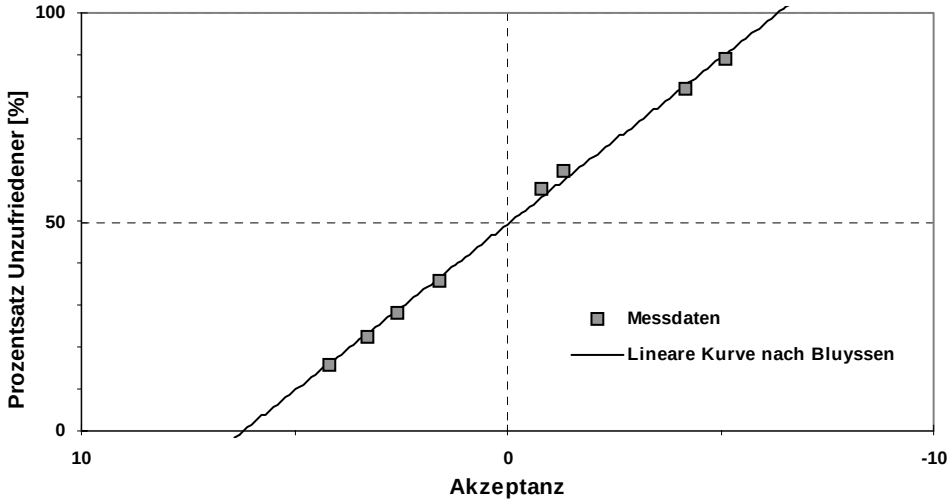

Bild 3.4-6: Der Zusammenhang zwischen Prozentsatz Unzufriedener und mittlerer Akzeptanz nach Bluyssen (1990)

Den Mittelwert für die Gruppe rechnete sie über einen linearen Zusammenhang, den sie empirisch ermittelte, in einen Prozentsatz Unzufriedener PD um.

Nach Gl. 3.4-6 kann man aus der mittleren Akzeptanz den Prozentsatz Unzufriedener PD ermitteln.

$$PD = 49{,}4 - 7{,}95 \cdot \overline{Ak} \qquad \text{(Gl. 3.4-6)}$$

mit $\overline{Ak}$: mittlere Akzeptanz

Dagegen untersuchten Gunnarsen & Fanger (1988, 1989, 1992) den gesamten Messbereich der Akzeptanz und korrigierten die Messwerte mit einer logistischen Regressionsgleichung (siehe Bild 3.4-7 und Gl. 3.4-7).

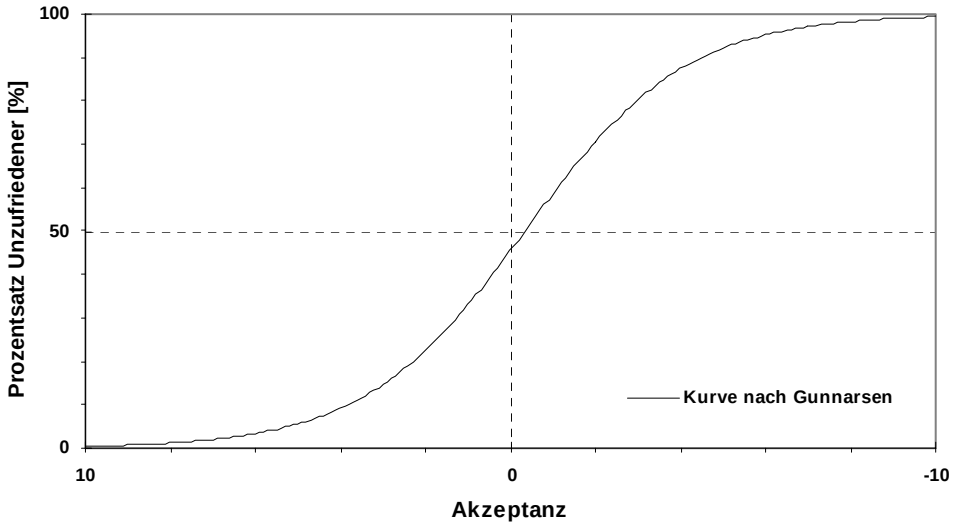

Bild 3.4-7: Der Zusammenhang zwischen Prozentsatz Unzufriedener und mittleren Akzeptanz nach Gunnarsen & Fanger (1988, 1989, 1992)

$$PD = \frac{\exp(-0{,}18 - 0{,}528 \cdot \overline{Ak})}{1 + \exp(-0{,}18 - 0{,}528 \cdot \overline{Ak})} \cdot 100 \qquad \text{(Gl. 3.4-7)}$$

Zum Vergleichen werden die beiden Funktionen (Gl. 3.4-6 und Gl. 3.4-7) in Bild 3.4-8 zusammen dargestellt:

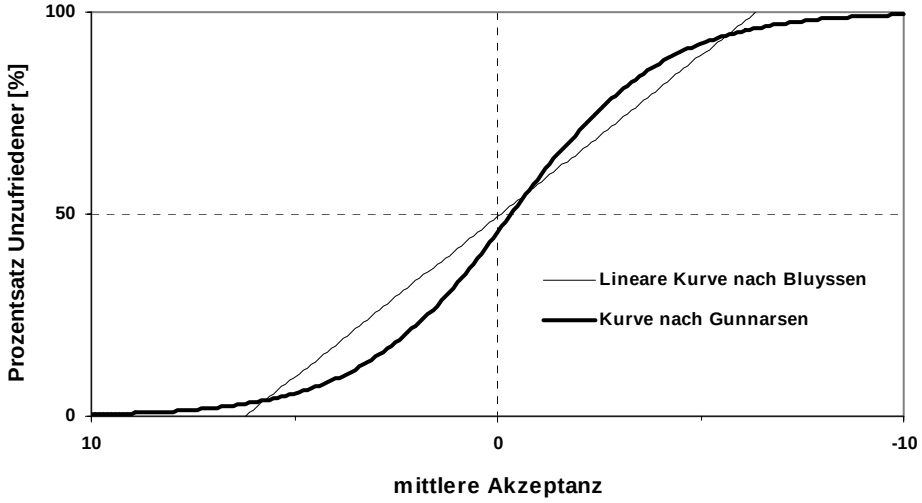

Bild 3.4-8: Die unterschiedlichen Zusammenhänge zwischen Prozentsatz Unzufriedener und Akzeptanz nach Bluyssen und Gunnarsen & Fanger

3.4.3 Das dezipol-Verfahren

Physikalische Größen werden immer als Produkt aus Zahlenwert und Einheit angegeben. Da die neue Einheit „olf“ als Verunreinigungslast der Luft bezeichnet wird, kann man die zu bewertenden unbekannten Verunreinigungslasten als ein Vielfaches der Standardperson als Einheit der Verunreinigungslast angeben. In der Praxis kann die Bestimmung der Verunreinigungslast der Luft nicht durch den Vergleich der zu bewertenden Luftqualität mit der Geruchsabgabe von Standardpersonen durchgeführt werden. Eine Möglichkeit besteht darin, Probanden nach der Akzeptanz zu befragen, den Prozentsatz Unzufriedener zu ermitteln und das Ergebnis in die Empfundene Luftqualität umzurechnen. Der Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, dass eine verhältnismäßig große Anzahl von Probanden befragt werden muss, um ein statistisch abgesichertes Ergebnis zu erhalten. Aus diesem Grund entwickelte Bluyssen (1990) ein Verfahren, bei dem ausgesuchte und trainierte Probanden mit Hilfe von bekannten Vergleichskonzentrationen die Empfundene Luftqualität direkt in der Einheit dezipol angeben.

Dabei geht man davon aus, dass sich für den Geruch, der durch Bioeffluenzen verursacht wird, der gleiche Zusammenhang zwischen Prozentsatz Unzufriedener und Empfundener Luftqualität einstellt, wie beim Geruch durch verschiedene Azetonkonzentrationen.

Azetonkonzentrationen als Meilensteine zur Bestimmung der Empfundenen Luftqualität mit trainierten Probanden

Als Vergleichssubstanz wurde Azeton (2-Propanon) ausgewählt, da es leicht flüchtig ist und einen intensiven Geruch hat. Azeton wird auch beim menschlichen Stoffwechsel produziert, so dass die maximal zulässige Konzentration (1000 ppm) relativ hoch ist und deutlich über den Konzentrationen liegt, die von den Vergleichsquellen abgegeben werden.

Den Zusammenhang zwischen der Azetonkonzentration und der Akzeptanz hat Bluyssen durch Befragung von 256 Probanden ermittelt. 8 verschiedene Acetonkonzentrationen wurden nach dem 20-Punktverfahren bestimmt. Für jede Acetonkonzentration wurde ein Mittelwert der Akzeptanz und der Prozentsatz Unzufriedener ermittelt. Die Messdaten sind in Tabelle 3.4-1 dargestellt.

Level Nr.	Akzeptanz	Prozentsatz Unzufriedener* [%]	Empfundene Luftqualität^{+} [dp_A]
1	-5,1	90,0	23,3
2	1,6	36,7	3,5
3	-1,3	59,7	8,8
4	2,6	28,7	2,4
5	4,2	16,0	1,1
6	-4,2	82,8	18,7
7	3,3	23,1	1,7
8	-0,8	55,8	7,6

Tabelle 3.4-1: Umrechnung der Akzeptanz-Bewertungen in die Empfundene Luftqualität nach Bluyssen (1990)

* Der Prozentsatz Unzufriedener wurde mit der Gleichung 3.4-6 ermittelt

$^{+}$ Die Empfundene Luftqualität wurde mit der Gleichung 3.4-8 ermittelt

Aus der mittleren Akzeptanz wurde der Prozentsatz Unzufriedener mit Hilfe von Gleichung 3.4-6 berechnet. Den Prozentsatz Unzufriedener hat man dann in Gleichung 3.4-8 eingesetzt und in die Empfundene Luftqualität umgerechnet. Diese Gleichung wird durch eine Umformung der Gleichung 3.4-3 ermittelt.

$$ELQ = 112 \cdot (5{,}98 - LN(PD))^{-4} \qquad \text{(Gl. 3.4-8)}$$

Aus den umgerechneten Messwerten ergab sich dann die Darstellung in Bild 3.4-8. Die Empfundene Luftqualität wurde dann als eine Funktion der Azetonkonzentration dargestellt. Durch eine lineare Regression wurde die Beziehung zwischen der Azetonkonzentration und der Empfundenen Luftqualität aufgestellt. Dieser Zusammenhang wurde später als Grundlage für die Festlegung der Meilensteine angewendet.

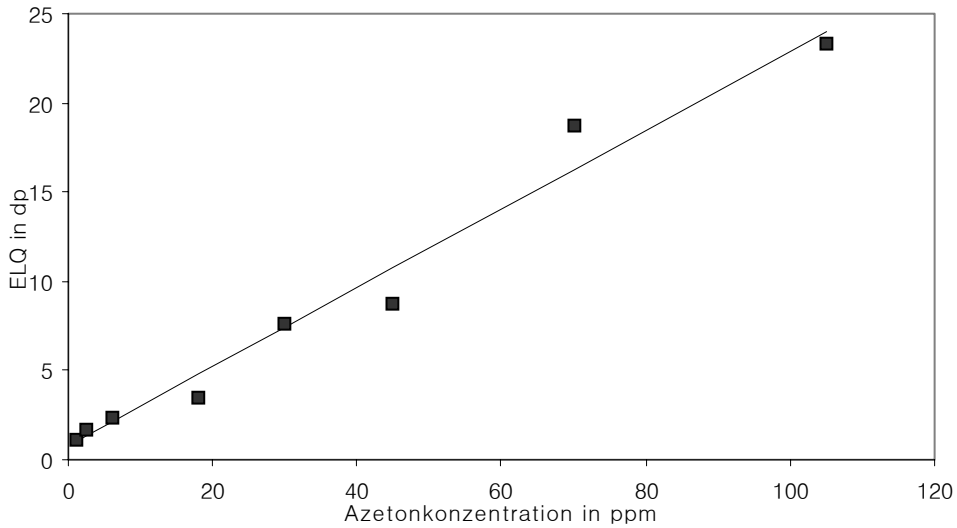

Bild 3.4-9: Zusammenhang zwischen Empfundener Luftqualität und Azeton-konzentration nach Bluyssen (1990)

$$ELQ = 0{,}84 + 0{,}22 \cdot c_{Azeton} \qquad \text{(Gl. 3.4-9)}$$

mit ELQ : Empfundene Luftqualität in dezipol

c_{Azeton} : Azetonkonzentration in ppm

Der Aufbau der Meilensteine

Eingestellt werden die Azetonkonzentrationen in Prüfgläsern (Meilensteinen), die in Bild 3.4-10 dargestellt sind. Dabei handelt es sich um Glasbehälter mit einem Volumen von 3 Litern und einer Öffnung mit einem Durchmesser von 8 cm. Die Öffnung ist durch einen Deckel verschlossen, in dem sich ein Ventilator befindet. Der Ventilator fördert einen Volumenstrom von 3 m^3/h. In dem Glasbehälter steht eine kleine mit Azeton gefüllte Glasflasche. Im Deckel der Azetonflaschen befindet sich ein Loch mit einem Durchmesser zwischen 0,5 mm – 10 mm. Die Größe des Durchmessers bestimmt die Menge an verdunstendem Azeton, das sich in der großen Glasflasche mit der Außenluft vermischen kann. Die Probanden halten die Nase direkt über den Riechtrichter, so dass sie die Intensität des Azetongeruchs wahrnehmen und in dezipol angeben können.

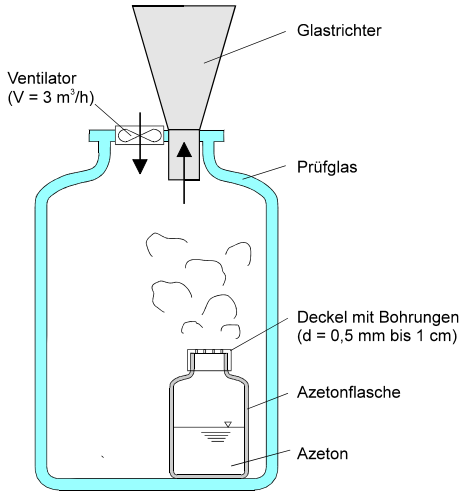

Bild 3.4-10: Aufbau der Meilensteine mit Azetonflaschen

Damit die Probanden den Vergleich mit den Meilensteinen richtig durchführen können, muss ihnen eine Frage gestellt werden, die sie mit Hilfe der Vergleichsquellen beantworten können. Die Fragestellung entspricht im Wesentlichen der Frage nach dem Prozentsatz Unzufriedener oder der Akzeptanz. Fragestellung und Vorgehensweise bei der Bestimmung der Empfundenen Luftqualität sind schematisch in Bild 3.4-11 dargestellt.

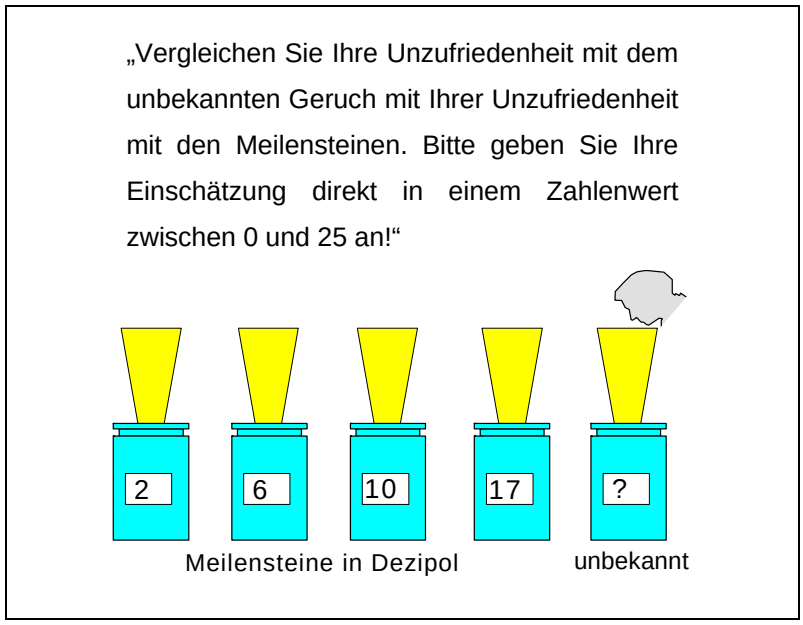

Bild 3.4-11: Fragestellung und schematischer Versuchsaufbau zur Bestimmung der Empfundenen Luftqualität einer unbekannten Probe in der Einheit dezipol nach Spiess (2001)

Die Probanden betreten zur Bestimmung der Empfundenen Luftqualität einzeln einen Prüfraum, in dem die Meilensteine aufgestellt sind und in dem die zu bewertende Probe wahrgenommen werden kann. Sie halten zur Bestimmung der unbekannten Empfundenen Luftqualität ihre Nase abwechselnd über die Öffnung der Glastrichter oder über die Öffnung mit dem zu bewertenden Geruch. Durch den Vergleich mit den Meilensteinen können die Probanden die unbekannte Empfundene Luftqualität direkt in der Einheit dezipol angeben.

Die Auswahl und das Training der Probanden

Das Training der Probanden wird mit Azetonkonzentrationen, sowie mit verschiedenen unbekannten Gerüchen durchgeführt und sollte mindestens viermal wiederholt werden. Im Anschluss an das Training der Probanden müssen zwei Teilaufgaben erfolgreich absolviert werden. Die erste besteht in der Bestimmung von acht unbekannten verschiedenen Azetonkonzentrationen, wobei die bekannten Meilensteine nicht zur Verfügung gestellt wurden. Geeignet für weitere Untersuchungen sind die Probanden, deren Bewertungen ein Kriterium für das Bestehen erfüllen. Das Kriterium ist in Bild 3.4-12 dargestellt.

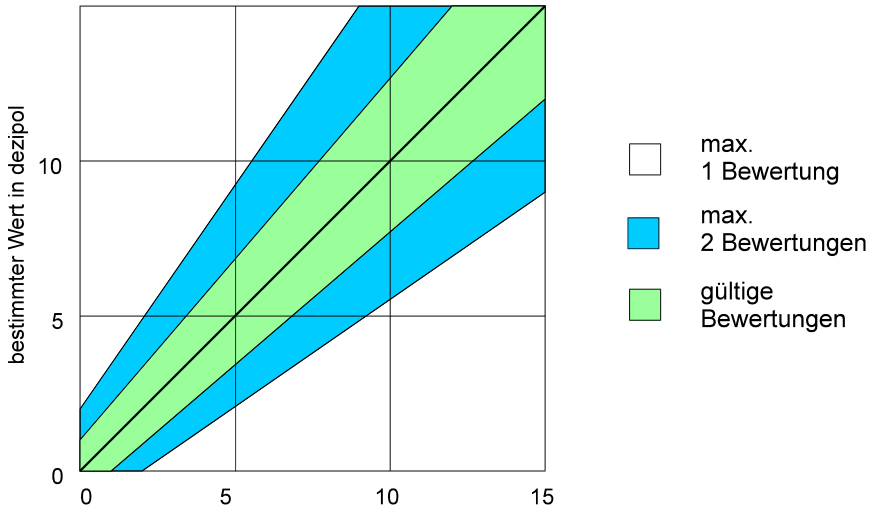

Bild 3.4-12: Toleranzbereich für die Bestimmung von acht unbekannten unterschiedlichen Azetonkonzentrationen (Clausen et al., 1993)

Von acht Angaben müssen mindestens fünf im mittleren, hellgrauen Bereich liegen. Zwei dürfen sich im dunkelgrauen Toleranzbereich befinden, eine Angabe ist außerhalb des Toleranzfeldes gestattet.

Statt mit Azetonkonzentration führten Clausen et al. (1993) die zweite Aufgabe des Abschlusstestes mit anderen Stoffen durch. Sie bestand in der Bestimmung der Luftbelastung durch typische Materialien des Raumes. Dieser Test wurde in Form einer Gruppenprüfung durchgeführt. Geruchswahrnehmungen sind subjektiv. Unterschiede in den Bewertungen des Geruchseindrucks von Probanden sind unvermeidlich. Hier ist von einer Normalverteilung der subjektiven Wahrnehmungen ausgegangen worden. Aus den Bestimmungen wurden ein mittlerer Wert und die Standardabweichung des Probandenkollektives gebildet. Zum Testen der Eignung wurde folgendermaßen, wie in Bild 3.4-13 dargestellt, verfahren: War die Standardabweichung kleiner als die zulässige Standardabweichung, die über dem zugehörigen Mittelwert für die Empfundene Luftqualität aufgetragen ist, wurde das Probandenkollektiv als geeignet betrachtet. Die Größen beider Achsen besitzen die Einheit dezipol (siehe Bild 3.4-13).

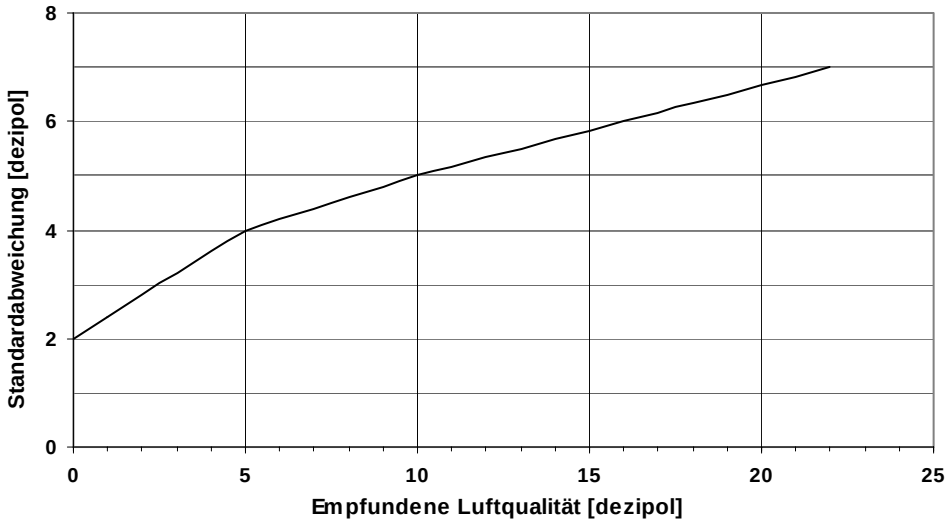

Bild 3.4-13: Zulässige Standardabweichung bei der Bewertung der Empfundenen Luftqualität bei der Bestimmung des Geruchs von Materialien nach Clausen et al. (1993)

Hierbei steigt der Absolutwert der zulässigen Standardabweichung mit zunehmender Luftbelastung an. Ihr relativer Wert - bezogen auf die ermittelte Empfundene Luftqualität - nimmt jedoch mit zunehmender ELQ ab. Das hat seinen Grund vermutlich darin, dass Sinneseindrücke grundsätzlich nicht linear sondern quasilogarithmisch erfasst werden. Der Grad der Abweichung wird daher relativ zum vorliegenden Wert empfunden. Daher steigt deren Absolutwert mit der steigenden Empfundenen Luftqualität an.

4 Mathematisch-statistische Erklärung des Zusammenhangs zwischen der mittleren Akzeptanz und dem Prozentsatz Unzufriedener

Die zwei am häufigsten erwähnten Gleichungen, die zur Bestimmung der Empfundenen Luftqualität nach dem 20-Punkt-Verfahren gefunden wurden, müssen zunächst mathematisch-statistisch analysiert werden, um die unterschiedlichen Aussagen in Tab. 2.1-1 zu erklären. Eine Gleichung wurde von Bluyssen (1990) und eine andere von Gunnarsen & Fanger (1988, 1989, 1992) ermittelt. Zur Analyse wird die Normalverteilung als das Näherungsmodell der tatsächlichen Verteilung angenommen. Zwei Parameter, das arithmetische Mittel μ und die Standardabweichung σ, legen die Verteilung eindeutig fest. Die Anwendung der Normalverteilung ist nicht nur deswegen vorteilhaft, sondern sie ist auch notwendig, weil wir keine tatsächlichen Messdaten sondern nur die beiden Werte, μ und σ, zur Analyse zur Verfügung haben.

4.1 Das mathematisch-statistische Näherungsmodell

Bei der 2-Punkt-Skala werden nur zwei Beantwortungsmöglichkeiten angeboten. Man kann daher bei der Bestimmung der Luftqualität seine Aussage entweder ‚akzeptabel' oder ‚nicht akzeptabel' zuordnen. Die widersprüchliche Aussage ‚akzeptabel und gleichzeitig nicht akzeptabel' ist hier ausgeschlossen. Man kann mit Hilfe von Gl. 3.4-1 den Prozentsatz Unzufriedener als Funktion der Geruchsstoffkonzentrationen ermitteln. Später wurde statt der 2-Punkt-Skala die stetige Skala zur Bestimmung der Luftqualität angewendet. Die stetige Skala erlaubt theoretisch eine unendlich vielstufige Unterscheidung der wahrgenommenen Geruchsstoffkonzentrationen. Häufig wurde die stetige Skala in 20 äquidistante Abschnitte geteilt und mit den ganzen Zahlen von –10 bis zu +10 oder mit den rationalen Zahlen von –1 bis zu +1 skaliert. Wegen dieser diskreten Skalierung bzw. Betrachtung wurde die stetige Skala auch das 20-Punkt-Verfahren genannt.

Wir können davon ausgehen, dass sich die einzelnen Akzeptanzbestimmungen eines Probandenkollektivs um einen Wert symmetrisch und glockenförmig verteilen.

Die Normalverteilung

Wenn eine Verteilung unimodal und symmetrisch ist und zudem annähernd einen glockenförmigen Verlauf aufweist, wird eine solche Verteilung als Normalverteilung bezeichnet. Sie wird durch eine sogenannte Glockenkurve mit dem Maximum an der Stelle μ und den Wendepunkten an den Stellen $\mu + \sigma$ und $\mu - \sigma$ charakterisiert (siehe Bild 4.1-1).

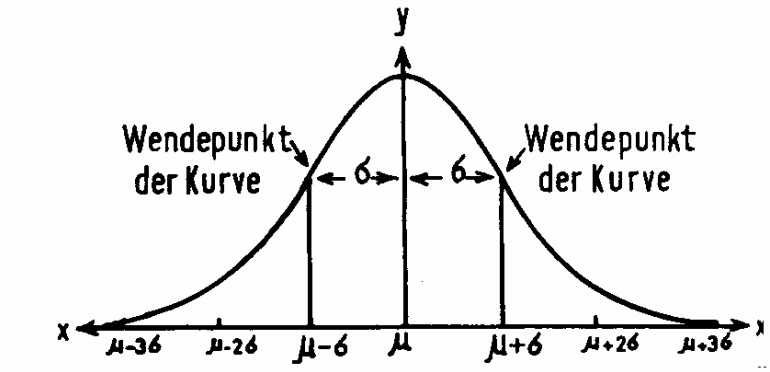

Bild 4.1-1: Normalverteilung mit Standardabweichung und Wendepunkten (Sachs, 1997)

- Die Kurve liegt symmetrisch zur Achse x = μ. Die Werte x´= μ - a und x´´= μ + a haben die gleiche Dichte und damit denselben Wert y.
- Das Maximum der Kurve beträgt $y_{max} = 1 / (\sigma \cdot \sqrt{2\pi})$, für $\sigma = 1$ hat es den Wert 0,398942. Für sehr großes x ($x \rightarrow \infty$) und sehr kleines x ($x \rightarrow - \infty$) strebt y gegen Null; die x-Achse stellt eine Asymptote dar.
- Die Standardabweichung der Normalverteilung ist durch die Abszisse der Wendepunkte gegeben. Die Ordinate der Wendepunkte liegt bei etwa $0{,}6 \cdot y_{max}$.

Die Häufigkeitsdichte der Normalverteilung ist durch die Gl. 4.1-1 gegeben.

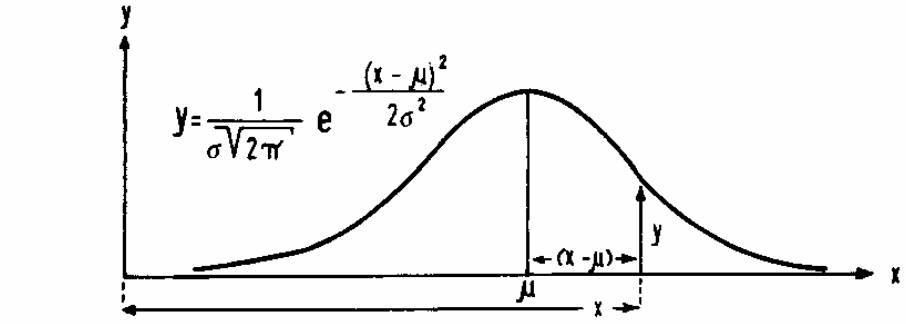

Bild 4.1-2: Häufigkeitsdichte y (Ordinate) für jeden Punkt x (Sachs, 1997)

$$y = f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \qquad \text{(Gl. 4.1-1)}$$

mit σ : Standardabweichung

μ : Mittelwert

Mit diesen zwei statistischen Kennwerten kann die Häufigkeitsverteilung als eine Funktion dargestellt werden. Diese Funktion wird oft auch als Dichtefunktion bezeichnet. Die Normalverteilung ist also ein Modell mit vielen mathematisch-statistisch günstigen Eigenschaften, das als ein Grundpfeiler der mathematischen Statistik angesehen werden kann. Es basiert darauf, dass sich viele zufällige Variable, die in der Natur beobachtet werden können, als Überlagerung sehr vieler einzelner, weitgehend unabhängiger Einflüsse, von denen keiner dominieren darf, also als Summe vieler einzelner, voneinander unabhängiger zufälliger Variablen auffassen lassen (Lothar Sachs, 1997; Jürgen Bortz, 1985).

Vergleich der Häufigkeitsverteilung mit der Normalverteilung

Vergleichen wir nun die Verteilung in Tab. 3.3-1 mit der Normalverteilung, um die Abweichung der als Beispiel angenommenen Bewertungsangaben von diesem Näherungsmodell zu verdeutlichen. Man kann mit Hilfe von Gl. 3.3-1 das arithmetische Mittel μ und mit Hilfe von Gl. 3.3-5 die Standardabweichung σ

ermitteln. Die Standardabweichung beträgt $\sigma = 4$ und das arithmetische Mittel ist $\mu = 0{,}33$ Einheiten groß. Nun kann die tatsächliche Häufigkeitsverteilung der Merkmalsausprägungen mit der Dichtefunktion, die mit Hilfe der Gleichung 4.1-1 ermittelt wird, verglichen werden. In Bild 4.1-3 sind die Häufigkeiten der tatsächlich bewerteten Akzeptanzen als Balkendiagramm und die Dichtefunktion als durchgezogene Linie zusammen dargestellt. An mehreren Stellen werden mehr oder weniger große positive bzw. negative Differenzen zwischen beiden Größen festgestellt.

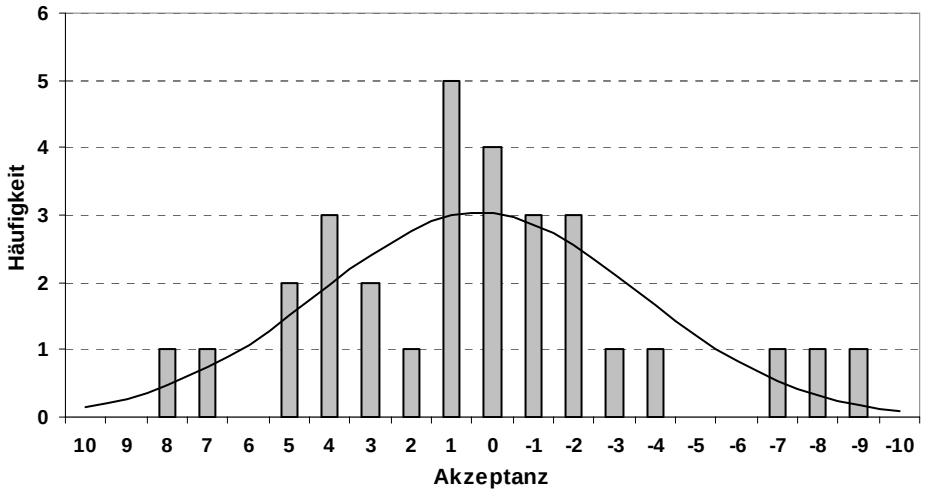

Bild 4.1-3: Tatsächliche Häufigkeitsverteilungen und als Näherungsmodell angenommene Dichtefunktion

Man kann auch die sukzessiv addierten und prozentuell berechneten Häufigkeitssummen (siehe Tab. 3.3-3 Spalte. (5)) mit der Summenhäufigkeitsfunktion der Normalverteilung vergleichen. Die Summenhäufigkeitsfunktion der Normalverteilung kann durch das Integral der Dichtefunktion dargestellt werden.

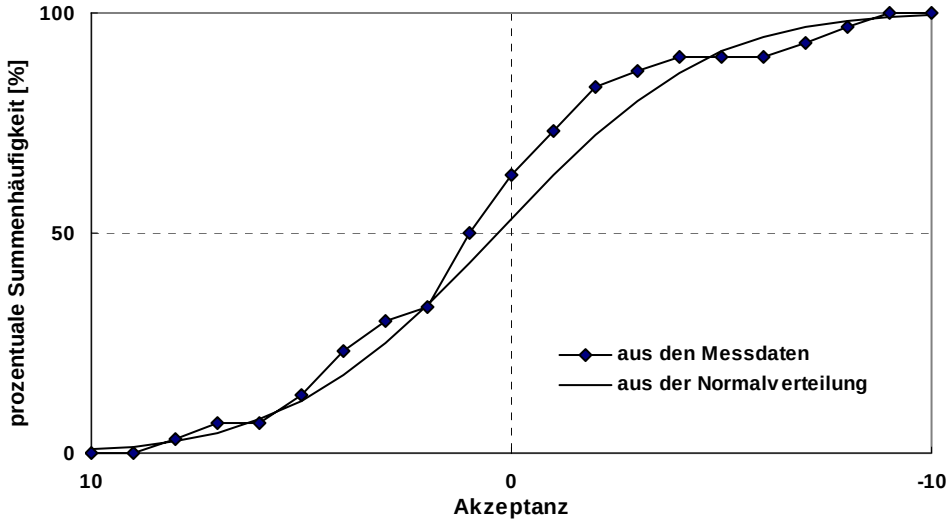

Bild 4.1-4: Prozentuale Summenhäufigkeitsfunktionen

Durch das Vergleichen der beiden prozentualen Summenhäufigkeiten in Bild 4.1-4 kann man feststellen, dass die Differenz der beiden Kurven nicht groß ist und daher die Häufigkeitsverteilung gut durch die Normalverteilung angenähert wird.

4.2 Die Methode der Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Ak und PD bei vorliegender Normalverteilung

Ermittlung des Prozentsatzes Unzufriedener

Da die als Näherungsmodell betrachtete Normalverteilung als eine stetige Funktion beschrieben wird, muss der Prozentsatz Unzufriedener aus der Dichtefunktion durch das Integral ermittelt werden. Man kann den Prozentsatz Unzufriedener in Analogie zu Gleichung 3.4-4' wie folgt ermitteln:

$$PD = \frac{\int_{-10}^{0} f(x)dx}{\int_{-10}^{10} f(x)dx} \cdot 100 \qquad \text{(Gl. 4.2-1)}$$

mit f(x): Dichtefunktion der Akzeptanzbestimmungen

Der Zähler entspricht der Anzahl der Probanden, die die Geruchsstoffkonzentration mit negativer Akzeptanz bestimmt haben. Der Nenner bezeichnet dagegen die Gesamtanzahl des Probandenkollektivs. Da das Integral der Gaußverteilung über das gesamte Intervall eins ergibt, kann der Nenner als eins betrachtet werden. Daher kann die Gleichung 4.2-1 zu folgender Formel vereinfacht werden:

$$PD = \int_{-10}^{0} f(x)dx \cdot 100 \qquad \text{(Gl. 4.2-2)}$$

mit f(x): Dichtefunktion der Akzeptanzbestimmungen

Die Summenhäufigkeitsfunktion der Normalverteilung als der Zusammenhang zwischen Ak und PD

Bei der Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der Akzeptanz und dem Prozentsatz Unzufriedener von Bluyssen und von Gunnarsen & Fanger wurden das arithmetische Mittel aus allen Akzeptanzbestimmungen des Probandenkollektives und der Prozentsatz Unzufriedener nach Gleichung 3.4-4 ermittelt.

Bevor der Zusammenhang zwischen der mittleren Akzeptanz und dem Prozentsatz Unzufriedener für den gesamten Akzeptanzbereich ermittelt wird, wird zunächst die günstige Eigenschaft der Normalverteilung zur Ermittlung dieses Zusammenhangs erwähnt. Es sei eine normalverteilte Akzeptanzbestimmung [N(2;3,5)] gegeben (siehe Bild 4.2-1). N bedeutet hierbei die Normalverteilung, die erste Zahl in runden Klammen die Lage des arithmetischen Mittels und die zweite Zahl die Standardabweichung.

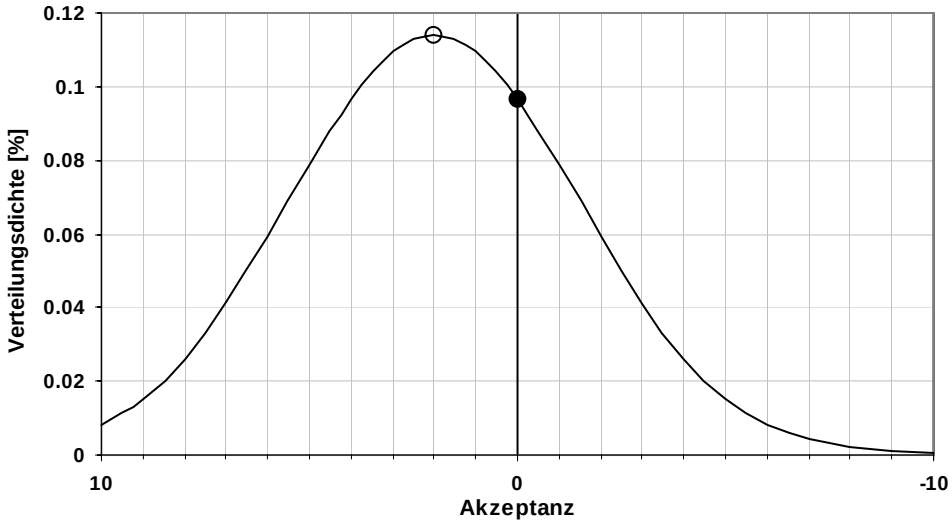

Bild 4.2-1: Die Dichtefunktion [N(2;3,5)]

Die Dichtefunktion ist wegen der eingeschränkten Skala unsymmetrisch und nicht glockenförmig. Diese unsymmetrische Verteilung wird vernachlässigt und als symmetrisch betrachtet. Ohne diese Annahme wird die mathematisch-statistische Erklärung erheblich erschwert, sogar unmöglich, da noch nicht untersucht wurde, in wie weit die eingeschränkte Skala die psychologische Entscheidung beeinflusst. Ohne diese Beschränkung sei die Akzeptanzverteilung um den Mittelwert +2 symmetrisch und glockenförmig. Der offene Kreis zeigt den Punkt des arithmetischen Mittels der einzelnen Bestimmungen. Er ist das Maß der zentralen Tendenz und repräsentiert die Verteilung. Der gefüllte Kreis liegt auf dem Punkt, wo man die einzelnen Akzeptanzbestimmungen nach der Zufrieden-/Unzufriedenheit beurteilt. Die Empfindungen, die im positiven Akzeptanzbereich von +10 bis 0 bestimmt werden, werden als ‚zufrieden' gewertet. Die im negativen Akzeptanzbereich bewerteten Empfindungen der Probanden werden als ‚unzufrieden' betrachtet.

Durch das Integral der Dichtefunktion kann man die prozentuale Summenhäufigkeit errechnen. Die Summenhäufigkeitsfunktion für die Normalverteilung [N(2;3,5)] ist in Bild 4.2-2 dargestellt.

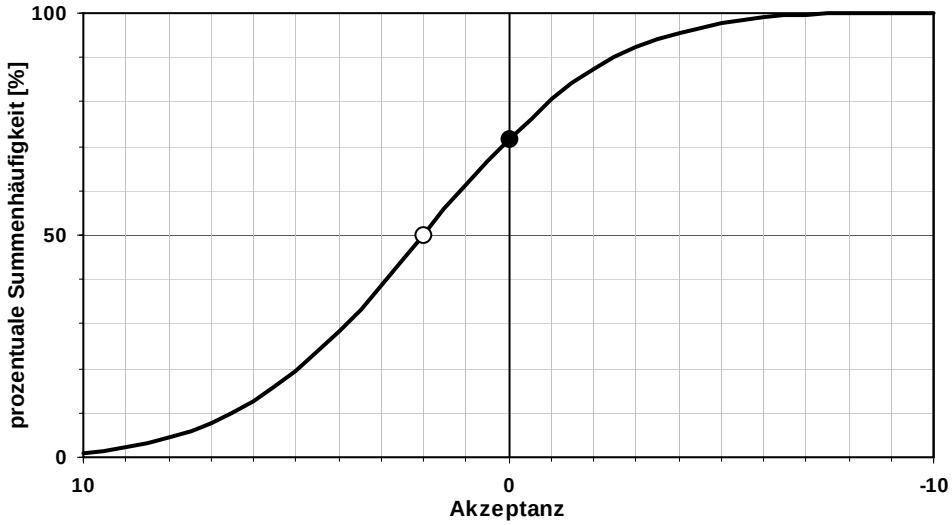

Bild 4.2-2: Summenhäufigkeitsfunktion der normal verteilten Akzeptanz-bestimmungen [N(2;3,5)]

Die Akzeptanzbestimmungen liegen zu ca. 72% im positiven Bereich und zu 28% im negativen Bereich. Daraus kann man interpretieren, dass bei der Akzeptanzverteilung mit der mittleren Akzeptanz μ = +2 und der Standardabweichung σ = 3,5 der Prozentsatz Unzufriedener 28% beträgt. Dieser Betrag kann nach Gleichung 4.2-2 rechnerisch ermittelt werden.

Dank der symmetrischen Eigenschaft der Gaußverteilung und durch die Festlegung des Kriteriums für die Zufrieden-/Unzufriedenheit braucht man für eine beliebige mittlere Akzeptanz nicht jedes Mal den Prozentsatz Unzufriedener zu errechnen. Man kann aus den Informationen über die statistischen Kennwerte der Verteilung und mit dem Kriterium der Zufriedenheits-/Unzufriedenheits-Entscheidung den Zusammenhang zwischen einer beliebigen mittleren Akzeptanz und dem dazugehörigen Prozentsatz Unzufriedener ermitteln. Um dies zu erklären betrachten wir eine zweite Normalverteilung [N(0;3,5)], die eine Standardabweichung σ = 3,5 wie [N(2;3,5)] und das arithmetische Mittel μ = 0 hat. Das arithmetische Mittel μ = 0 besagt, dass das Grenzkriterium für die einzelnen Akzeptanzbestimmungen nach Zufrieden-/Unzufriedenheit dem Mittelwert Ak = 0 entspricht. Zur Veranschaulichung der Verteilungen werden die zwei Dichtefunktionen [N(0;3,5)] und [N(2;3,5)] in Bild 4.2-3 zusammen dargestellt.

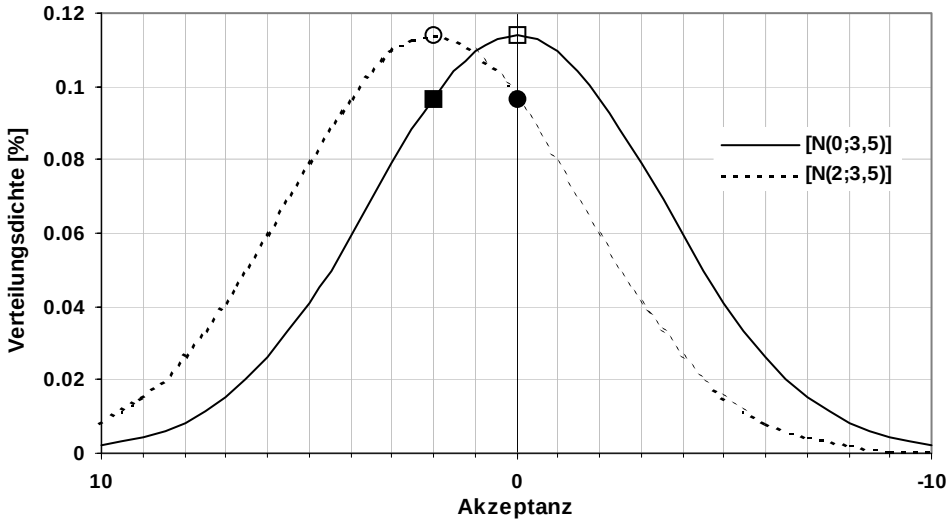

Bild 4.2-3: Zwei Dichtefunktionen der Normalverteilung [N(2;3,5)] und [N(0;3,5)]

Der gefüllte Kreis für die Dichtefunktion [N(2;3,5)] bei einem Akzeptanzwert von Ak = 0 liegt auf dem gleichen Niveau der Verteilungsdichte wie für die Dichtefunktion [N(0;3,5)] bei einem Akzeptanzwert von Ak = 2. Dieser Wert wird in Bild 4.2-3 mit dem gefüllten Viereck gekennzeichnet. Das arithmetische Mittel für die Dichtefunktion [N(0;3,5)] (das leere Viereck) liegt auf der Akzeptanz-Skala Ak = 0 und für die Dichtefunktion [N(2;3,5)] (der leere Kreis) auf der Akzeptanz-Skala Ak = 2. Die Summenhäufigkeitsfunktionen für die beiden Verteilungen werden in Bild 4.2-4 dargestellt.

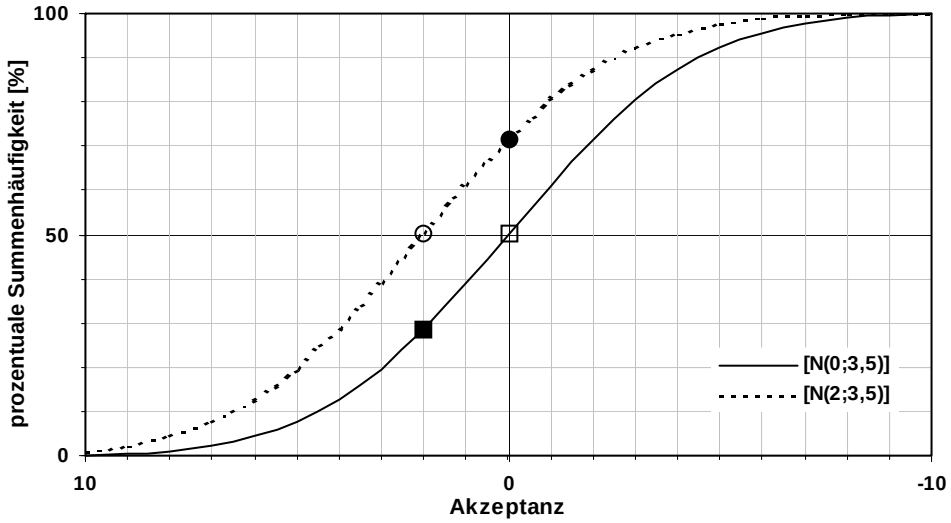

Bild 4.2-4: Summenhäufigkeitsfunktionen der Verteilungen [N(0;3,5)] und [N(2;3,5)]

Beim Vergleich der beiden Summenhäufigkeitsfunktionen für die Verteilungen [N(2;3,5)] und [N(0;3,5)] können wir leicht feststellen, dass man keineswegs den Prozentsatz Unzufriedener für jede beliebige mittlere Akzeptanz berechnen muss, sondern ihn aus der Summenhäufigkeitsfunktion für die Verteilung [N(0;3,5)] ablesen kann. Der Prozentsatz Unzufriedener bei der Verteilung [N(2;3,5)] kann nach Gl. 4.2-2 errechnet werden. Er beträgt 28% (siehe Bild 4.2-2).

Um den Prozentsatz Unzufriedener für die Normalverteilung [N(2;3,5)] zu ermitteln, kann man statt der Gleichung 4.2-2 also folgendes Verfahren (siehe Gl. 4.2-3) anwenden: Man kann statt des Bereichs von –10 bis zu 0 für die Verteilung [N(2;3,5)] den Bereich von +10 bis +2 für die Verteilung [N(0;3,5)] integrieren. +2 bezeichnet den Mittelwert der Verteilung [N(2;3,5)].

$$PD = \int_{+10}^{+2} f(x)dx \cdot 100 \qquad \text{(Gl. 4.2-3)}$$

mit PD: Prozentsatz Unzufriedener bei der Verteilung [N(2;3,5)]
f(x): Dichtefunktion der Akzeptanzbestimmungen [N(0;3,5)]

Unter der Voraussetzung der Unabhängigkeit der Standardabweichung von der Geruchsstoffkonzentration kann also die prozentuale Summenhäufigkeitskurve der Normalverteilung [N(0;σ)] als Zusammenhang zwischen der mittleren Akzeptanz und dem Prozentsatz Unzufriedener betrachtet werden.

Allgemein gilt, dass das Ergebnis des Integrals der Dichtefunktion von [N(μ;σ)] im Akzeptanzbereich von – ∞ bis Null gleich dem des Integrals der Dichtefunktion von [N(0;σ)] im Bereich von + ∞ bis zur jeweils ermittelten mittleren Akzeptanz μ ist.

$$PD = \int_{-\infty}^{0} f(x_\mu)dx \cdot 100 = \int_{+\infty}^{\mu} f(x_0)dx \cdot 100 \qquad \text{(Gl. 4.2-4)}$$

mit PD : Prozentsatz Unzufriedener bei der Verteilung [N(μ;σ)]
$f(x_\mu)$: Dichtefunktion der Verteilung [N(μ;σ)]
$f(x_0)$: Dichtefunktion der Verteilung [N(0;σ)]

Zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der mittleren Akzeptanz und dem Prozentsatz Unzufriedener benötigt man also nur die Standardabweichung, wenn ein Akzeptanzwert ermittelt wurde und daraus der Prozentsatz Unzufriedener bestimmt werden soll.

4.3 Vergleich der Näherungskurven mit der Summenhäufigkeitsfunktion

Seit das 20-Punkt-Verfahren zur Bestimmung der Luftqualität angewendet wird, werden zwei Näherungskurven am häufigsten verwendet. Um diese Näherungskurven, die nach Bluyssen und nach Gunnarsen & Fanger zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen der mittleren Akzeptanz und dem Prozentsatz Unzufriedener angegeben werden, mit der Summenhäufigkeitsfunktion einer Normalverteilung zu vergleichen, brauchen wir lediglich die Information über die Standardabweichung des Probandenkollektivs für den betrachteten Geruchsstoffträger.

Vergleich der Näherungskurve von Bluyssen mit einer Summenhäufigkeits-funktion

Zur Ermittlung des Prozentsatzes Unzufriedener wurde von Bluyssen (1990) die Akzeptanz der Azetonkonzentration mit Hilfe einer Gruppe von 256 Stundenten im Alter zwischen 18 und 30 Jahren bestimmt. Dafür wurden 8 verschiedene Azetonkonzentrationen dargeboten. Die Standardabweichungen variierten abhängig von der Azetonkonzentration. Zwischen beiden Größen gibt es keinen deutlich bemerkbaren korrelativen Zusammenhang. Die verschiedenen Standardabweichungen sind abhängig von der jeweils ermittelten mittleren Akzeptanz in Bild 4.3-1 dargestellt.

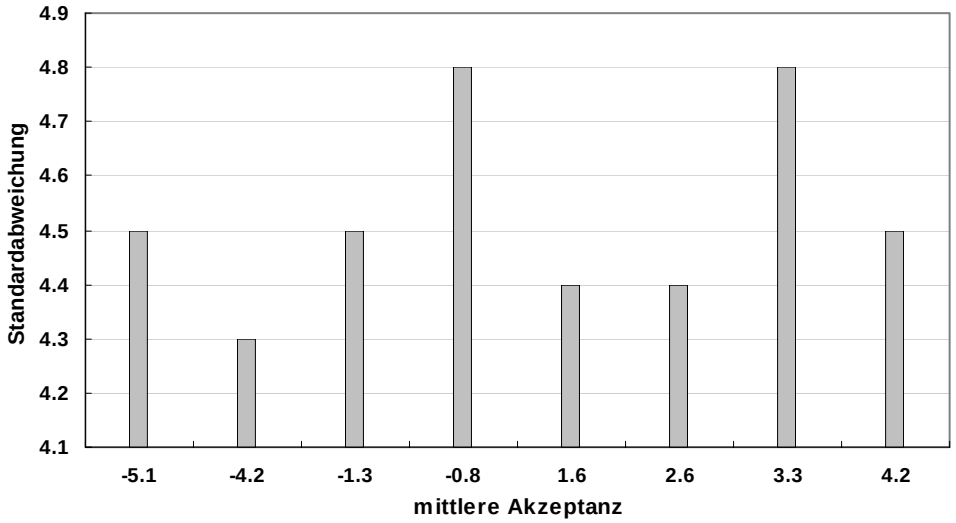

Bild 4.3-1: Variierende Standardabweichungen bei der Akzeptanzbestimmung nach dem 20-Punkt-Verfahren (Bluyssen, 1990)

Die durchschnittliche Standardabweichung beträgt $\sigma = 4{,}5$. Da das Kriterium für die Zufriedenheits-/Unzufriedenheits-Unterscheidung beim 20-Punkt-Verfahren mit Ak = 0 eindeutig festgelegt ist, kann man aus beiden Werten die Summenhäufigkeitsfunktion durch das Integral der Normalverteilung [N(0;4,5)] ermitteln. Mit dieser Summenhäufigkeitsfunktion kann man den Zusammenhang zwischen der mittleren Akzeptanz und dem Prozentsatz Unzufriedener angeben. In Bild 4.3-2 werden die Summenhäufigkeitsfunktion und die Messdaten von Bluyssen zusammen dargestellt. Bluyssen bestimmte den Prozentsatz Unzufriedener als die Funktion der mittleren Akzeptanz.

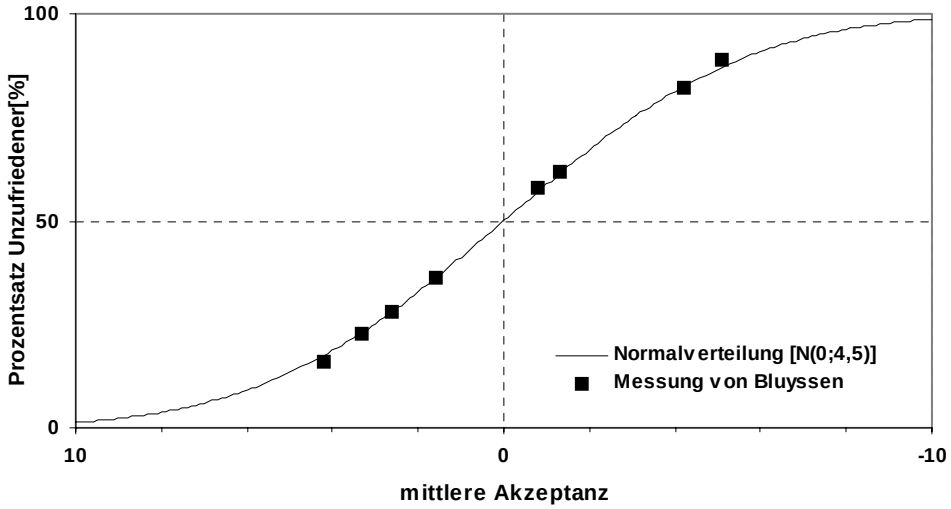

Bild 4.3-2: Vergleich der linearen Funktion von Bluyssen (1990, siehe Gl. 3.4-6) mit der Summenhäufigkeitsfunktion einer Normalverteilung [N(0;4,5)]

Die vereinfachte lineare Gleichung von Bluyssen (siehe Gl. 3.4-6) nähert sich der Summenhäufigkeitsfunktion der Normalverteilung [N(0;4,5)] sehr gut an. Durch die lineare Kurve betrachtete Bluyssen nur den Akzeptanzbereich von +6,2 - -6,2. Im Gegensatz dazu kann man mit der Summenhäufigkeitskurve den Zusammenhang für den gesamten Bereich berücksichtigen.

Vergleich der logistischen Regressionsgleichung von Gunnarsen & Fanger mit einer Summenhäufigkeitsfunktion

Da für das Integral der Dichtefunktion keine geschlossene Lösung existiert, kann bei der Ermittlung der Summenhäufigkeitsfunktion der integrierte Betrag der Normalverteilung numerisch ausgewertet werden oder greift man auf Tabellenwerte zurück. Gunnarsen & Fanger (1988, 1989, 1992) passten bei der Feststellung des Zusammenhangs zwischen der mittleren Akzeptanz und dem Prozentsatz Unzufriedener die Messwerte stattdessen mit einer logistischen Regressionsgleichung an (siehe Gl. 3.4-7). Da die einzelnen Messdaten nicht zur Verfügung stehen, wird hier statt der Messdaten die Gleichung von Gunnarsen & Fanger mit einer Summenhäufigkeitsfunktion verglichen (siehe Bild 4.3-3).

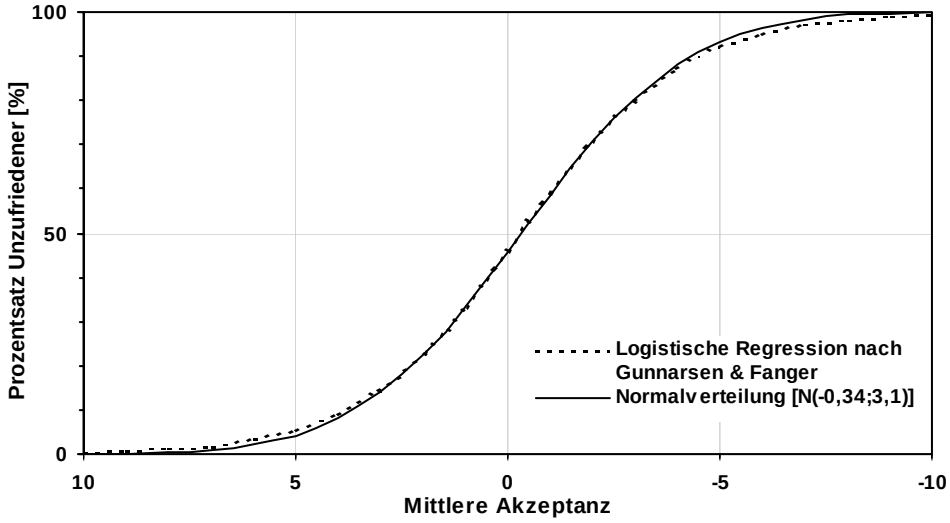

Bild 4.3-3: Vergleich der logistischen Regressionsgleichung von Gunnarsen & Fanger mit der Summenhäufigkeitsfunktion einer Normalverteilung [N(-0,34;3,1)]

Die Funktion von Gunnarsen & Fanger nähert sich der Summenhäufigkeitsfunktion der Normalverteilung [N(-0,34;3,1)] sehr gut an. Nach der Näherungskurve von Gunnarsen & Fanger sollte die Akzeptanz Ak = -0,34 als der Kriteriumspunkt für die Zufrieden-/Unzufriedenheit betrachtet werden. Es gibt aber keinen Grund dafür, dass man die Akzeptanz Ak = -0,34 tatsächlich als das Kriterium für die Zufrieden-/Unzufriedenheit betrachten muss. Vielmehr kann man vermuten, dass sie durch die Näherung der Messdaten entstand.

Wenn das negative Kriterium Ak = - 0,34 von Gunnarsen & Fanger ignoriert wird, kann man zwischen den beiden Summenhäufigkeitsfunktionen für die Normalverteilungen [N(-0,34;3,1)] und [N(0;4,5)] nur als einzigen Unterschied feststellen, dass die Standardabweichungen für beide unterschiedlich groß sind.

Hierfür kann man zwei Gründe nennen:

- Die verschiedenen Probandenkollektive sind der Grund für die unterschiedlichen Standardabweichungen.
- Die verschiedenen Geruchsarten des Geruchsstoffes sind der Grund. Die Standardabweichung σ = 4,5 ist für die Azetonkonzentration gültig. Die Standardabweichung σ = 3,1 soll für den Geruch in Innenräumen angewendet werden.

Wenn die verschiedenen Geruchsstoffträger unterschiedliche Wahrnehmungen und dadurch unterschiedliche Standardabweichungen hervorrufen oder die Standardabweichungen abhängig vom eingesetzten Probandenkollektiv variieren, muss man für jede Geruchsart oder für jedes Probandenkollektiv eine dafür repräsentative Summenhäufigkeitsfunktion ermitteln.

4.4 Die Abhängigkeit der Summenhäufigkeitsfunktion von der Standardabweichung

Man kann die repräsentative Summenhäufigkeitsfunktion einer Normalverteilung [N(0;σ)] als die Funktion, die den Zusammenhang zwischen der mittleren Akzeptanz und dem Prozentsatz Unzufriedener bezeichnet, betrachten. Wie stark die Standardabweichung die Summenhäufigkeitsfunktion, d.h. den Zusammenhang zwischen der mittleren Akzeptanz und dem Prozentsatz Unzufriedener beeinflussen kann, wird im folgenden erklärt.

Verschiedene Verteilungen abhängig von der Standardabweichung

Nehmen wir zwei Normalverteilungen mit verschiedenen Standardabweichungen (σ = 1 und σ = 4) an, die um ein arithmetisches Mittel von Ak = -2 symmetrisch verteilt sind.

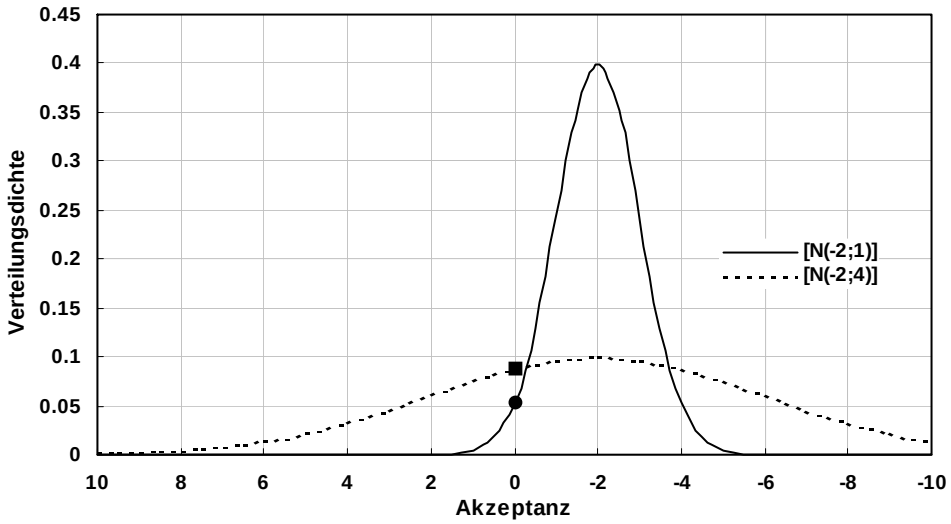

Bild 4.4-1: Häufigkeitsverteilungen mit zwei unterschiedlichen Standardabweichungen von σ = 1 und σ = 4

Wegen des flachen Verlaufs der Dichtefunktion bei der Standardabweichung σ = 4 verteilen sich die Akzeptanzbestimmungen breiter und gleichmäßiger als bei der Standardabweichung σ = 1 auf der Akzeptanzskala. Deswegen muss man sich auf eine große Abweichung einstellen, wenn man den Prozentsatz Unzufriedener ohne Berücksichtigung der Standardabweichung einfach aus der mittleren Akzeptanz abliest, wie im nächsten Abschnitt erläutert.

Verschiedene Prozentsätze Unzufriedener abhängig von der Standardabweichung

Zur Veranschaulichung der Abweichung des Prozentsatzes Unzufriedener werden die prozentualen Summenhäufigkeiten für die Normalverteilungen von [N(-2;1)] und [N(-2;4)] in Bild 4.4-2 zusammen dargestellt.

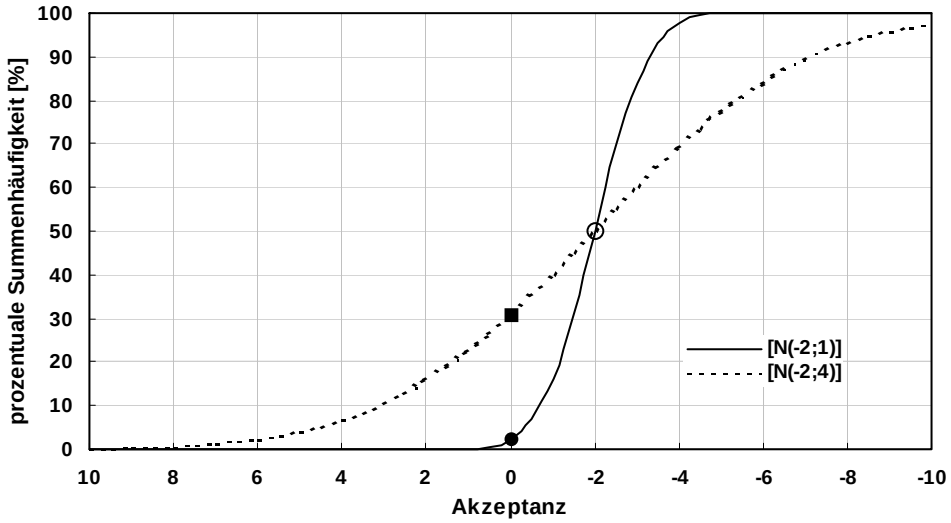

Bild 4.4-2: Prozentuale Summenhäufigkeitsfunktionen von [N(-2;1)] und [N(-2;4)]. Die prozentuale Summenhäufigkeit von 2% entspricht dem Prozentsatz Unzufriedener von 98%.

Obwohl die arithmetischen Mittelwerte μ_1 für die Normalverteilung [N(-2;1)] und μ_2 für die Normalverteilung [N(-2;4)] mit Ak = -2 (siehe Bild 4.4-2: leerer Kreis) gleich groß sind, beträgt der Prozentsatz Unzufriedener ca. 98% für die Standardabweichung von $\sigma = 1$ (siehe gefüllten Kreis) und ca. 69% für die von $\sigma = 4$ (siehe gefülltes Viereck). Die Differenz des Prozentsatzes Unzufriedener von ca. 30% entsteht allein durch die unterschiedliche Standardabweichung der beiden Verteilungen.

Wie man den Prozentsatz Unzufriedener für eine beliebige mittlere Akzeptanz mit einer repräsentativen Summenhäufigkeitsfunktion berechnen kann, wurde schon in Kap. 4.2 erwähnt. Anschließend wurden die repräsentativen Summenhäufigkeitsfunktionen für die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der mittleren Akzeptanz und dem Prozentsatz Unzufriedener angegeben. In Bild 4.4-3 sind die zwei repräsentativen Summenhäufigkeitsfunktionen für die Normalverteilungen mit $\sigma = 1$ und $\sigma = 4$ dargestellt. Eine kleine Standardabweichung σ führt zu einem steilen Anstieg der Summenhäufigkeitsfunktion, eine große zu einem flachen Anstieg. Man kann sich als einen Extremfall vorstellen, dass die Akzeptanzbestimmungen der Probanden gleich groß sind. In diesem Fall ist die Standardabweichung $\sigma = 0$. Die Summenhäufigkeitsfunktion entspricht dann der Sprungfunktion (siehe Bild 3.4-5).

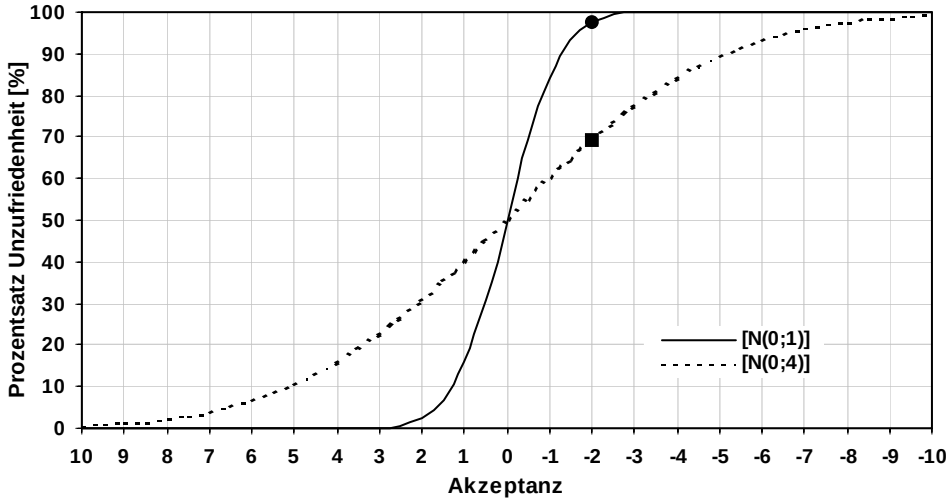

Bild 4.4-3: Verschiedene Summenhäufigkeitsfunktion abhängig von der Standardabweichung

In Bild 4.4-4 wird die Abweichung des berechneten Prozentsatzes Unzufriedener abhängig von der Standardabweichung als Funktion der mittleren Akzeptanz dargestellt.

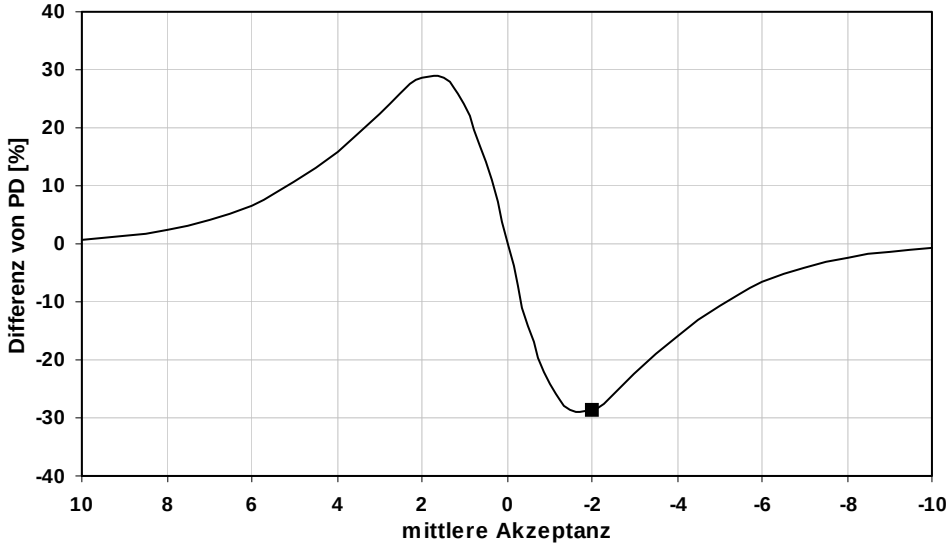

Bild 4.4-4: Differenz des Prozentsatzes Unzufriedener zwischen zwei Normalverteilungen mit unterschiedlichen Standardabweichungen $\sigma = 1$ und $\sigma = 4$

Wenn wir davon ausgehen, dass sich die einzelnen Akzeptanzbestimmungen eines Probandenkollektivs um einen Mittelwert symmetrisch und glockenförmig verteilen, kann man jeden beliebigen Zusammenhang zwischen der mittleren Akzeptanz und dem Prozentsatz Unzufriedener abhängig von Geruchsstoffarten oder von Probandenkollektiven durch die beiden Parameter μ und σ eindeutig festlegen. Dagegen kann man z.B. mit der logistischen Regressionsgleichung von Gunnarsen & Fanger oder mit der Geradefunktion von Bluyssen nur einen Zusammenhang zwischen der mittleren Akzeptanz und dem Prozentsatz Unzufriedener beschreiben. Es sieht so aus, als sei das zu einfach, weil die Standardabweichung nicht konstant ist. Das kann man als einen wesentlichen Vorteil der Normalverteilung betrachten.

5 Die mathematisch-statistisch ermittelte neue Korrelation zwischen ELQ und PD

Zur Auswertung der angegebenen Empfundenen Luftqualität ist es notwendig, den Zusammenhang zwischen der mittleren Empfundenen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener zu ermitteln. Da jede Akzeptanzbestimmung der Probanden durch positive bzw. negative Vorzeichen der Skala eindeutig zur Akzeptanz oder zur Inakzeptanz zugeordnet werden kann, konnte man nach dem 20-Punkt-Verfahren den Zusammenhang zwischen beiden Größen ohne besondere Schwierigkeit ermitteln. Dagegen ist die Ermittlung des Zusammenhangs nach dem dezipol-Verfahren nicht so einfach, weil hier kein eindeutiges Kriterium der jeweils bewerteten Empfundenen Luftqualität nach der Zufrieden-/Unzufriedenheit vorhanden ist. Daher wird hier zuerst die Sprungfunktion als das Kriterium für die Zufrieden-/Unzufriedenheit betrachtet. Anschließend werden aus den Messdaten der Azetonkonzentration und der Räume im HRI die Funktionen für das Kriterium für die Zufrieden-/Unzufriedenheit ermittelt.

5.1 Die Sprungfunktion als das einfache Grenzkriterium zur Zufrieden-/Unzufriedenheit

Bei unendlich hoher Trennschärfe eines Probandenkollektives würde das Kriterium für die Zufrieden-/Unzufriedenheit eine Sprungfunktion sein. Unter der unendlich hohen Trennschärfe versteht man die Interpretation zur Bestimmung der Empfundenen Luftqualität, bei der die unter einem Trennpunkt bewerteten Empfundenen Luftqualitäten als 100% zufrieden und die darüber liegenden als 100% unzufrieden betrachtet werden. In Analogie zum Beurteilungskriterium beim 20-Punkt-Verfahren (siehe Bild 3.4-5) wird ein Punkt als das Kriterium festgestellt. Da der Prozentsatz Unzufriedener nach der Fanger´schen Gleichung (siehe Gl. 3.4-8) bei der Empfundenen Luftqualität von 6,1 dezipol 50% beträgt, kann man den Wert von 6,1 dezipol als den Trennpunkt betrachten. Statt der Empfundenen Luftqualität von 6,1 dezipol wird hier der Wert, bei dem der Prozentsatz Unzufriedener nach den am HRI durchgeführten Messungen mit Azetonkonzentrationen bei 50% liegt, als Trennpunkt angenommen. Der Punkt ist um 0,4 dezipol größer und liegt bei einer Empfundenen Luftqualität von 6,5 dezipol.

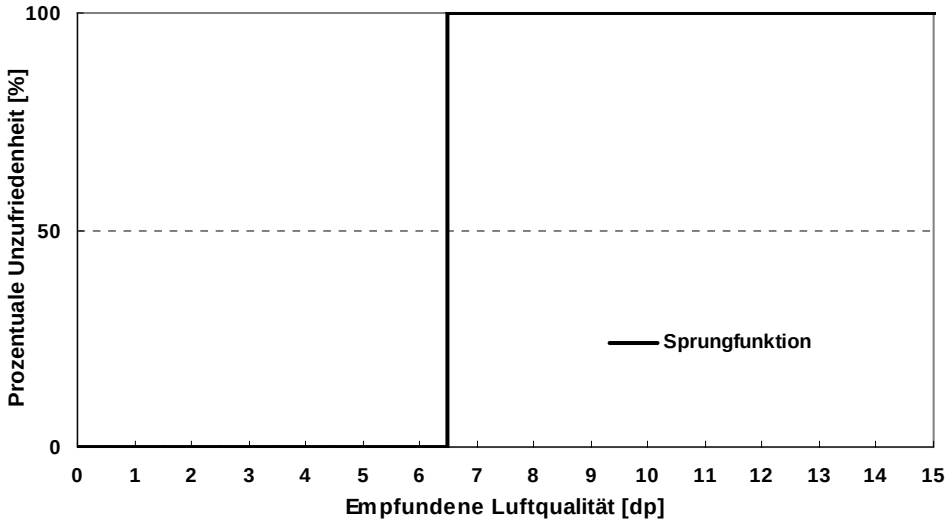

Bild 5.1-1: Sprungfunktion als Kriterium der bewerteten Empfundenen Luftqualität für die Zufrieden-/Unzufriedenheit

5.1.1 Der vereinfachte Zusammenhang zwischen ELQ und PD

Wenn alle Probanden bei der Bestimmung der Empfundenen Luftqualität wie bei der Akzeptanzbewertung bei einem Wert, d.h. hier ELQ = 6,5 dezipol, von „akzeptabel“ zu „nicht akzeptabel“ übergehen, braucht man in Analogie zum 20-Punkt-Verfahren nur die Standardabweichung zu ermitteln, um den Zusammenhang zwischen dem Prozentsatz Unzufriedener und der mittleren Empfundenen Luftqualität darzustellen. Die Methode wurde bereits in Kap. 4 erwähnt. Zur Erklärung der Methode nehmen wir zunächst einmal an, dass sich die bestimmten bewerteten Empfundenen Luftqualitäten eines Probandenkollektives für eine dargebotene Geruchsträgerkonzentration um einen Mittelwert normal verteilen. Für diese Verteilung seien die zwei Parameter, d.h. die Standardabweichung σ = 1,8 dezipol und der Mittelwert μ = 8,5 dezipol groß. Die Verteilung der bewerteten Empfundenen Luftqualitäten von trainierten Probandenkollektiven hat nach Spiess (1998) eine durchschnittliche Standardabweichung von 1,8 dezipol. Die mittlere Empfundene Luftqualität von 8,5 dezipol wird beispielsweise willkürlich angenommen. Die Dichtefunktion der Normalverteilung [N(8,5;1,8)] und die Sprungfunktion werden zur Erklärung des Vorgehens bei der Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der mittleren Empfundenen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener in einem Bild zusammen dargestellt (siehe Bild 5.1-2).

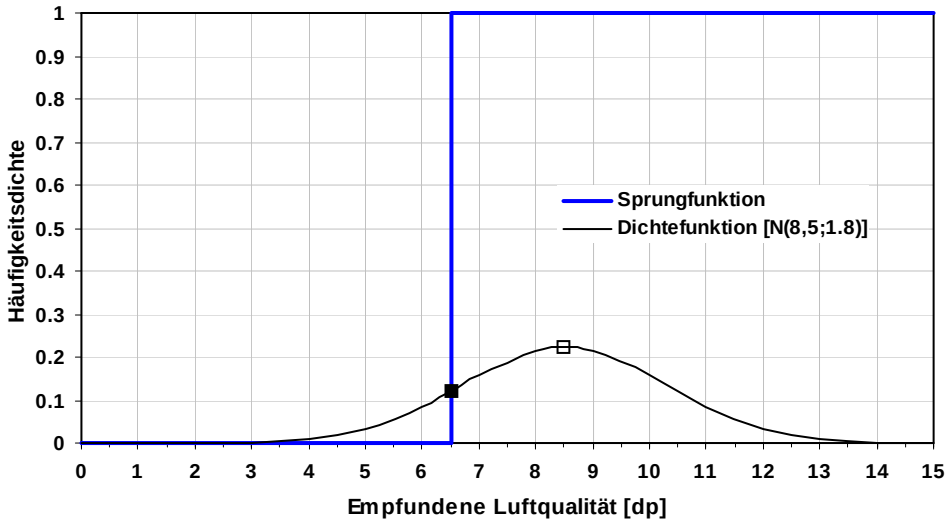

Bild 5.1-2: Sprungfunktion und Dichtefunktion von [N(8,5;1,8)]

Die bewerteten Empfundenen Luftqualitäten, die größer als das Grenzkriterium von hier ELQ = 6,5 dezipol sind, werden als 100% unzufriedenstellend betrachtet. Für die Verteilung in Bild 5.1-2 kann man den Prozentsatz Unzufriedener in Analogie zu Gl. 4.2-2 wie folgt ermitteln:

$$PD = \int_{6,5}^{\infty} f(x)dx \cdot 100 \qquad \text{(Gl. 5.1-1)}$$

mit x ; angegebene Empfundene Luftqualität als Zufallsvariable

f(x) ; Dichtefunktion von [N(8,5;1,8)]

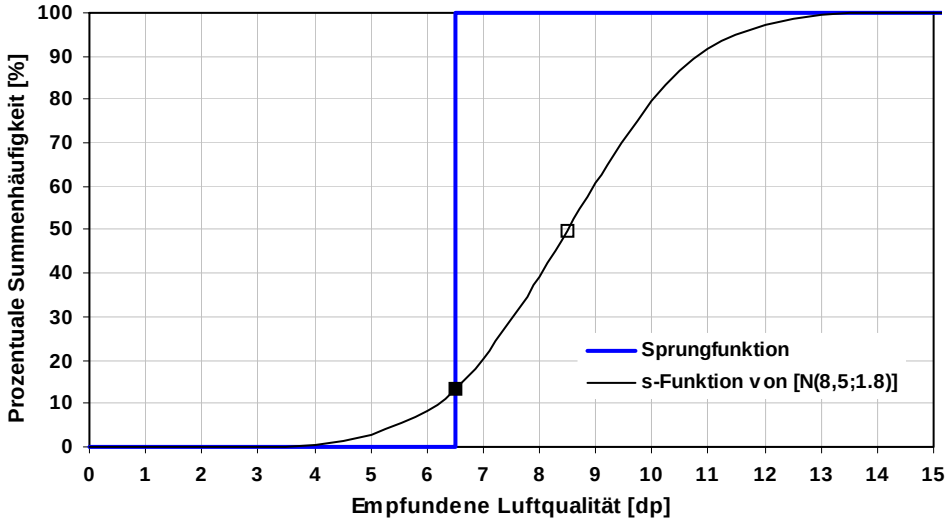

Bild 5.1-3: Prozentuale Summenhäufigkeitsfunktion von [N(8,5;1,8)]

Wegen der symmetrischen Eigenschaft der Normalverteilung ist der Prozentsatz Unzufriedener nach Gleichung 5.1-1 gleich dem Prozentsatz Unzufriedener nach Gleichung 5.1-2.

$$PD = \int_{0}^{8,5} f(x)dx \cdot 100 \qquad \text{(Gl. 5.1-2)}$$

mit x : Empfundene Luftqualität als Zufallsvariable
8,5 : Arithmetisches Mittel der Verteilung von [N(8,5;1,8)]
f(x) : Dichtefunktion von [N(6,5;1,8)].

Dabei bedeutet das arithmetische Mittel μ = 6,5 dezipol für die Dichtefunktion von [N(6,5;1,8)] nicht die tatsächlich bewertete mittlere Empfundene Luftqualität sondern das Grenzkriterium für Zufrieden-/Unzufriedenheit. In diesem Beispiel beträgt die tatsächlich bewertete mittlere Empfundene Luftqualität für die Verteilung von [N(8,5;1,8)] μ = 8,5 dezipol.

Wegen der symmetrischen Verteilungseigenschaft der Normalverteilung braucht man zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der beliebig großen mittleren Empfundenen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener nur einen Parameter - die Standardabweichung. In Analogie zur Korrelation zwischen der Akzeptanz und dem Prozentsatz Unzufriedener nach dem 20-Punkt-Verfahren (siehe Gl. 4.2-4) kann man unter der Summenhäufigkeitsfunktion für die Normalverteilung von [N(6,5;1,8)] den Zusammenhang zwischen der mittleren Empfundenen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener verstehen.

Hier wird diese S-Funktion zur Unterscheidung von den Summenhäufigkeitsfunktionen für die Verteilung der bewerteten Empfundenen Luftqualitäten als die repräsentative Summenhäufigkeitsfunktion bezeichnet. Repräsentativ bedeutet also hier nicht, dass sie die gesamten Summenhäufigkeitsfunktionen repräsentiert, sondern, dass man mit dieser einzigen Summenhäufigkeitsfunktion den Zusammenhang zwischen der Empfundenen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener beschreiben kann. Dabei wird jedoch vorausgesetzt, dass die Standardabweichung unabhängig von der Geruchsstoffkonzentration konstant ist. Die repräsentative Summenhäufigkeits-funktion lautet dann:

$$PD = \int_0^{\mu} f(x)dx \qquad \text{(Gl. 5.1-3)}$$

mit x : Empfundene Luftqualität als Zufallsvariable

μ : Arithmetisches Mittel der Verteilung von [N(μ;1,8)]

f(x) : Dichtefunktion von [N(6,5;1,8)]

Die repräsentative Summenhäufigkeitsfunktion in Bild 5.1-4 stellt den Zusammenhang zwischen der mittleren Empfundenen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener dar. Das leere Viereck bezeichnet den Prozentsatz Unzufriedener bei einer mittleren Empfundenen Luftqualität von μ = 8,5 dezipol.

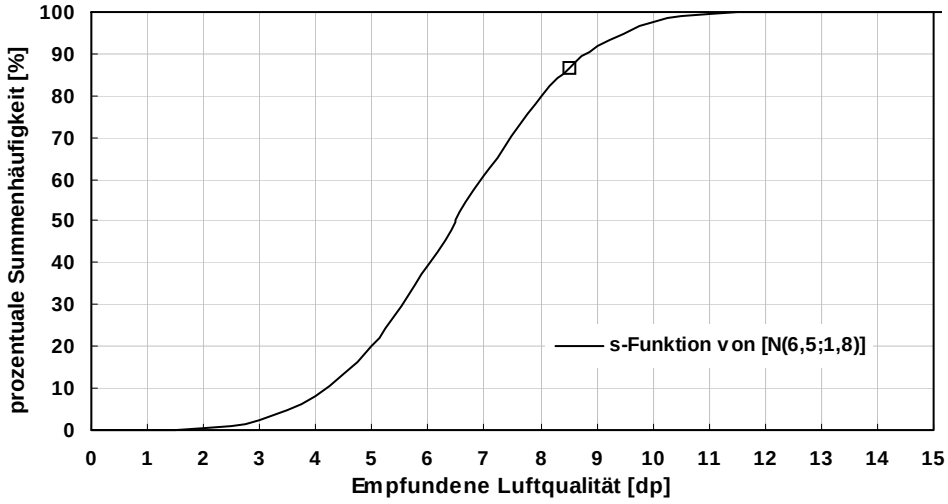

Bild 5.1-4: Repräsentative Summenhäufigkeitsfunktion von [N(6,5;1,8)] zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen der beliebig großen mittleren Empfundenen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener

5.1.2 Die neue Korrelation zwischen ELQ und PD

Die Sprungfunktion in Kap. 5.1-1 steht nur für das einfach angenommene Kriterium der angegebenen Empfundenen Luftqualität zur Zufrieden-/Unzufriedenheit in Analogie zur Sprungfunktion für das 20-punkt-Verfahren. Danach werden geringere als mit 6,5 dezipol angegebene Empfundene Luftqualitäten einfach als ‚zufrieden' und größere als 6,5 dezipol als ‚unzufrieden' interpretiert. Es ist jedoch zu prüfen, ob die Sprungfunktion als das Grenzkriterium für die Zufrieden-/Unzufriedenheit für das dezipol-Verfahren angewendet werden kann.

Ermittlung der Funktion für das Grenzkriterium

Zur Ermittlung der Funktion, die zur Beurteilung der angegebenen Empfundenen Luftqualität bezüglich der Zufrieden-/Unzufriedenheit dient, wird nur die Angabe der Akzeptanz/Inakzeptanz bei der angegebenen Empfundenen Luftqualität in Betracht gezogen.

Betrachten wir folgendes Beispiel: ein Proband (Nr.1) gibt bei einer Azetonkonzentration (c_A) die Empfundene Luftqualität von 5 dezipol an und nennt diesen Geruchsreiz akzeptabel. Ein zweiter Proband (Nr.2) bewertet die gleiche Konzentration (c_A) auch mit einer Empfundenen Luftqualität von 5 dezipol. Im Unterschied zum ersten Probanden bezeichnet der zweite Proband diesen Geruch als nicht akzeptabel.

Nun wird die Azetonkonzentration (c_B) geändert. Ein dritter Proband (Nr.3) gibt dafür eine Geruchsintensität von 5 dezipol an und nennt diesen Reiz akzeptabel. Die Empfundene Luftqualität wird 3 mal beobachtet und unabhängig von der Azetonkonzentration von den Probanden mit jeweils 5 dezipol als gleich groß eingeschätzt. Nun kann man daraus statistisch ableiten, dass zwei von drei Probanden bei einer angegebenen Empfundenen Luftqualität von 5 dezipol zufrieden sind. Mit anderen Worten: Die Probanden, die die Empfundene Luftqualität mit 5 dezipol bewertet haben, sind zu wahrscheinlich 33% unzufrieden.

Bei diesem im Beispiel erläuterten Verfahren achtet man also nur auf die Häufigkeit *akzeptabel* bzw. *nicht akzeptabel* für den gerade betrachteten - vom Probanden angegebenen - dezipol-Wert. Auf diese Weise lässt sich das Grenzkriterium für die Zufrieden-/Unzufriedenheit der angegebenen dezipol-Werte ermitteln.

Die tabellarische Darstellung des Grenzkriteriums

Bei den am Hermann-Rietschel-Institut (HRI) an der TU-Berlin durchgeführten Versuchsreihen zur Ermittlung der Empfundenen Luftqualität wurden verschiedene Azetonkonzentrationen nach dem dezipol-Verfahren und gleichzeitig nach dem 2-Punkt-Verfahren bzw. nach dem 20-Punkt-Verfahren bewertet. Zur Ermittlung des Grenzkriteriums für die angegebenen Empfundenen Luftqualitäten werden die Messdaten vom HRI verwendet (Bitter, 2001). Die Ermittlung des Kriteriums ist möglich, da zur Bestimmung der Empfundenen Luftqualität das dezipol-Verfahren und parallel dazu das 20-Punkt-Verfahren angewendet wurden. Die Empfundenen

Luftqualitäten werden zuerst mit einer äquidistanten Intervallgröße von 0,5 dezipol klassifiziert und tabellarisch angeordnet (siehe Tabelle 5.1-1).

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Betrachteter (angegebener) dezipol-Wert [dp]	Häufigkeit der Wertung von „akzeptabel“	3 gliedriger gleitender Durchschnitt der Häufigkeit „akzeptabel“	Häufigkeit der Wertung von „nicht akzeptabel“	3 gliedriger gleitender Durchschnitt der Häufigkeit „nicht akzeptabel“	Die prozentuelle Häufigkeit der Unzufriedener [%] =(5)/((3)+(5))*100
0,0	1	1,00	0	0,00	0,0
0,5	2	4,33	0	0,00	0,0
1,0	10	6,67	0	0,00	0,0
1,5	8	20,67	0	0,33	1,6
2,0	44	21,67	1	0,67	3,0
2,5	13	34,00	1	1,67	4,7
3,0	45	24,33	3	1,33	5,2
3,5	15	33,00	0	2,00	5,7
4,0	39	19,33	3	1,33	6,5
4,5	4	27,00	1	4,33	13,8
5,0	38	15,67	9	3,67	19,0
5,5	5	23,00	1	7,67	25,0
6,0	26	10,67	13	5,00	31,9
6,5	1	11,33	1	11,00	49,3
7,0	7	2,67	19	9,00	77,1
7,5	0	4,00	7	17,00	81,0
8,0	5	1,67	25	11,33	87,2
8,5	0	1,67	2	16,00	90,6
9,0	0	0,00	21	8,00	100,0
9,5	0	0,00	1	13,33	100,0
10,0	0	0,00	18	6,33	100,0
10,5	0	0,00	0	12,33	100,0
11,0	0	0,00	19	7,00	100,0
11,5	0	0,00	2	15,33	100,0
12,0	0	0,00	25	9,33	100,0
12,5	0	0,00	1	11,33	100,0
13,0	0	0,00	8	3,00	100,0
Summe	263	-	181	-	-

Tabelle 5.1-1: Die Häufigkeit der Zufrieden-/Unzufriedenheit beim jeweils betrachteten dezipol-Wert

In Bild 5.1-5 wird die prozentuelle Häufigkeit der Unzufriedenen bei der angegebenen Empfundenen Luftqualität graphisch dargestellt. Dabei wird die prozentuelle Häufigkeit Unzufriedener als die wahrscheinliche Unzufriedenheit abhängig von der angegebenen Empfundenen Luftqualität bezeichnet.

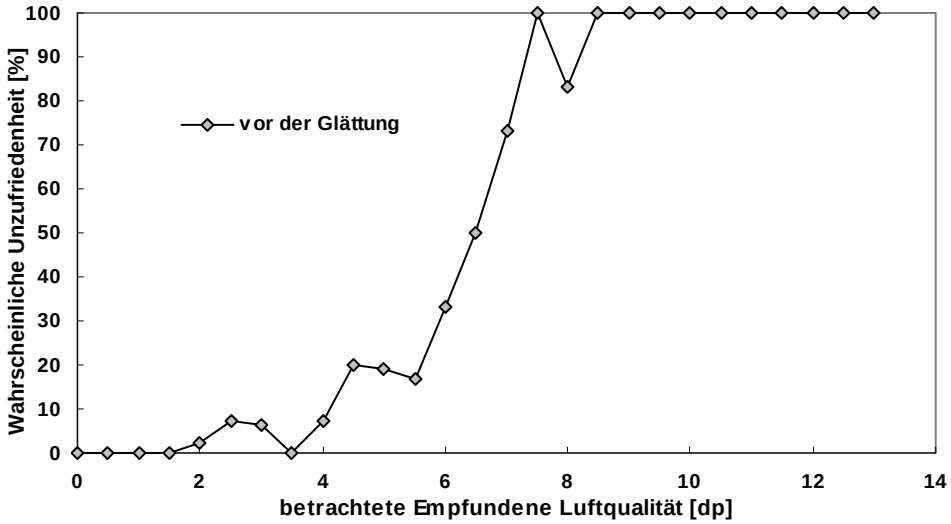

Bild 5.1-5: Die prozentuelle Häufigkeit der Unzufriedenheit der Probanden bei der angegeben Empfundenen Luftqualität

Da die einem Polygon zugrunde liegende Variable stetig ist, dürfen sich theoretisch keine Knicke im Linienverlauf ergeben. Eine recht gute Annäherung an einen „geglätteten“ Verlauf würden wir erhalten, wenn das untersuchte Kollektiv sehr groß und die Kategorien sehr eng wären. Eine andere Möglichkeit, den Kurvenverlauf zu glätten, stellt das Verfahren des gleitenden Durchschnitts dar. Grundgedanke dieses Verfahrens ist die Annahme, dass sich die Häufigkeiten in benachbarten Kategorien auf einer stetigen Variablen nicht sprunghaft, sondern kontinuierlich verändern. Trifft diese Annahme zu, kann die Häufigkeit einer Kategorie durch die Häufigkeiten der benachbarten Kategorien im Interpolationsverfahren bestimmt werden. Zufällig bedingte Irregularitäten und Sprünge im Verlauf eines Polygons können somit ausgeglichen werden, indem statt der Häufigkeit einer Kategorie k der Durchschnitt der Häufigkeiten der Kategorien k-1, k und k+1 eingesetzt wird. Formal ausgedrückt, erhalten wir als neuen Häufigkeitswert $\bar{f}_k$ für die Kategorie k

$$\bar{f}_k = \frac{f_{(k-1)} + f_k + f_{(k+1)}}{3} \qquad \text{(Gl. 5.1-4)}$$

Da jeweils 3 benachbarte Kategorien berücksichtigt werden, bezeichnen wir diese Ausgleichung als dreigliedrig. Die wahrscheinliche Unzufriedenheit in Tabelle 5.1-1

Spalte (6) und die Kurve in Bild 5.1-6 wurden durch eine dreigliedrige Ausgleichung der Häufigkeiten ermittelt. Der Unterschied im Kurvenverlauf der Summenhäufigkeit mit und ohne Glättung wird in Bild 5.1-6 deutlich. Die geglättete Summenhäufigkeitskurve hat keine starken Auf- und Abschwünge mehr.

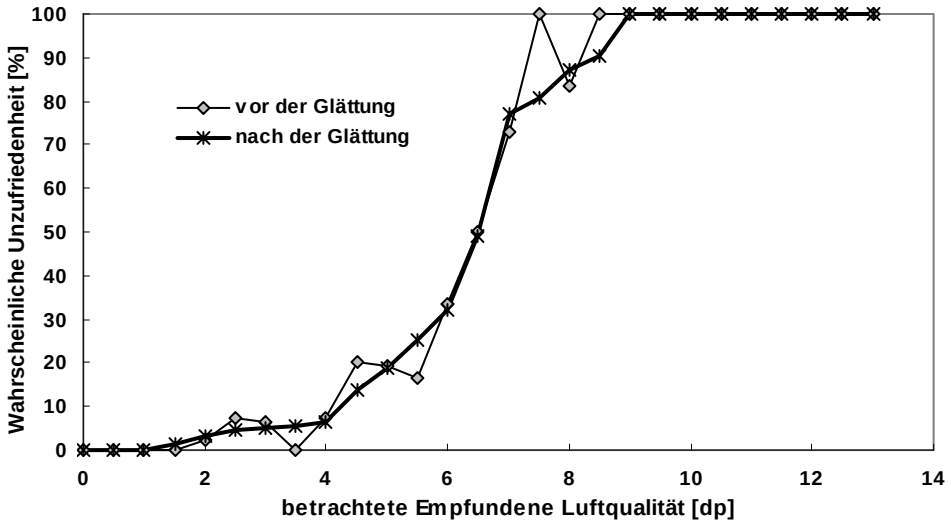

Bild 5.1-6: Die dreigliedrig geglättete Summenhäufigkeitskurve gegenüber ungeglättetem Kurvenverlauf

Die 3-gliedrig geglätteten Messdaten nähern sich sehr gut an die Summenhäufigkeitsfunktion, die durch das Integral aus der Dichtefunktion mit einem Mittelwert von 6,5 dezipol und einer Standardabweichung von 1,5 dezipol ermittelt wurde (siehe Bild 5.1-7).

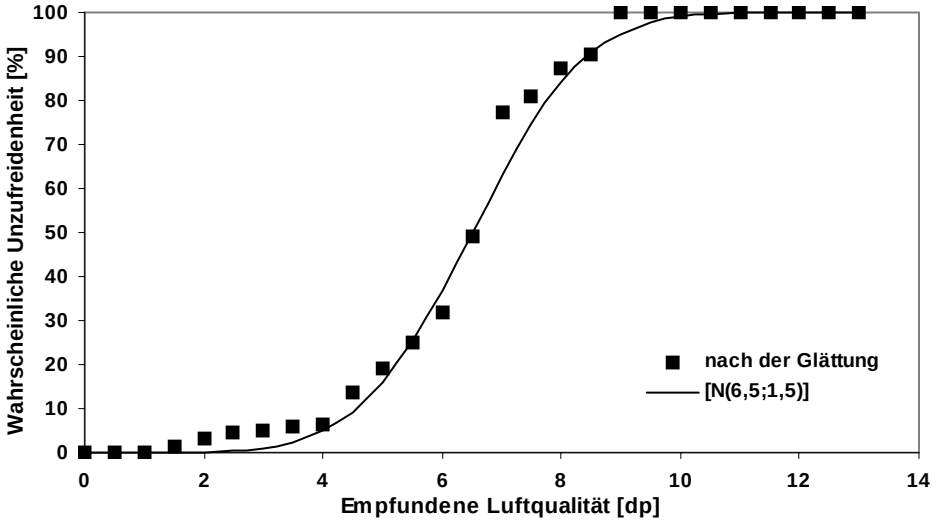

Bild 5.1-7: Die wahrscheinliche Unzufriedenheit bei der angegebenen ELQ

Zum Vergleichen des Unterschiedes zwischen der Sprungfunktion und der Summenhäufigkeitsfunktion sind in Bild 5.1-8 die beiden Funktionen zusammen dargestellt. Die S-Funktion ist auf einen interindividuell und intraindividuell unterschiedlichen Geruchseindruck über Akzeptanz/Inakzeptanz eines jeden Probanden zurückzuführen. Diese S-Funktion muss demnach statt der einfachen Sprungfunktion in Kap. 5.1-1 für das Grenzkriterium zur Zufrieden-/Unzufriedenheit für die angegebenen Empfundenen Luftqualitäten von Azetonkonzentrationen angewendet werden.

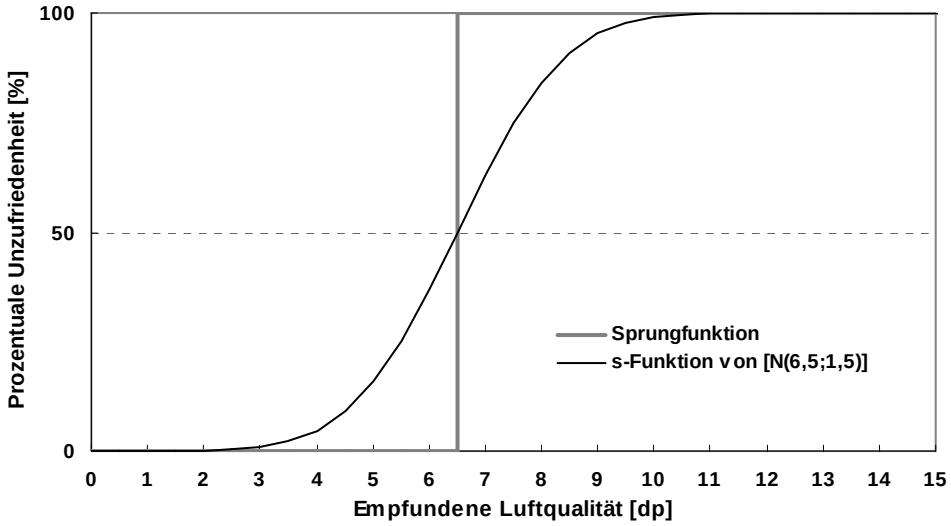

Bild 5.1-8: Vergleich der S-Funktion von [N(6,5;1,5)] mit der Sprungfunktion [N(6,5;0)]

Der Prozentsatz Unzufriedener ist von der wahrscheinlichen Unzufriedenheit, also von der prozentualen Häufigkeit von Unzufriedenen zu unterscheiden. Ferner muss man die bewertete Empfundene Luftqualität von der errechneten Empfundenen Luftqualität unterscheiden. Letztere wird indirekt aus dem Prozentsatz Unzufriedener nach Gl. 3.4-8 rechnerisch ermittelt. Unter der bewerteten Empfundenen Luftqualität kann man dagegen die nach dem dezipol-Verfahren direkt in dezipol bestimmte Empfundene Luftqualität verstehen.

Die Möglichkeit der Darstellung des neuen Zusammenhangs zwischen ELQ und PD

Da das Grenzkriterium keine Sprungfunktion sondern die S-Funktion ist, muss man zur Ermittlung der repräsentativen Summenhäufigkeitsfunktion, die zur

Beschreibung des Zusammenhangs zwischen der mittleren bewerteten Empfundenen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener angewendet werden kann, nicht nur die Standardabweichung sondern auch die S-Funktion der wahrscheinlichen Unzufriedenheit berücksichtigen.

Die Verteilung der bewerteten Empfundenen Luftqualität von trainierten Probandenkollektiven hat nach Spiess (1998) eine durchschnittliche Standardabweichung σ von 1,8 dezipol. Diese Größenordnung wird entsprechend dem Fokus der Arbeit zur Darstellung des Einflusses der Standardabweichung sowie zur Erklärung des Unterschiedes zwischen der Fangerschen Kurve und der S-Kurve übernommen. In Bild 5.1-9 werden die S-Funktion von [N(6,5;1,5)], die die wahrscheinliche Unzufriedenheit der betrachteten Empfundenen Luftqualität für die Azetonkonzentrationen bezeichnet, und die Dichtefunktion von [N(7;1,8)], die beispielsweise zur Erklärung des Vorgehens bei der Ermittelung des Zusammenhangs zwischen der Empfundenen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener angenommen werden soll, zusammen dargestellt. Die Dichtefunktion kann hierbei als eine Verteilung der tatsächlich bewerteten Empfundenen Luftqualität durch ein Probandenkollektiv bei einer dargebotenen Azetonkonzentration betrachtet werden.

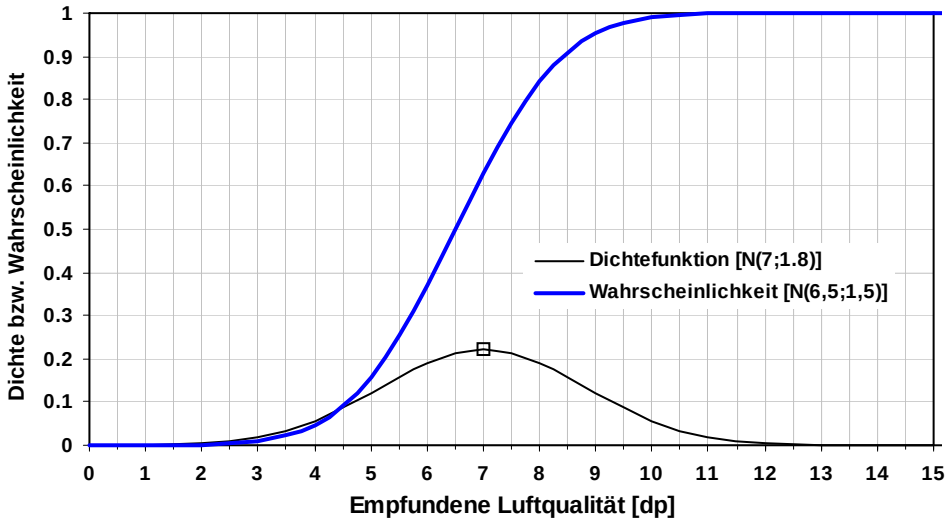

Bild 5.1-9: Die wahrscheinliche Unzufriedenheit bei der angegebenen Empfundenen Luftqualität und die Verteilungsdichte der tatsächlich bewerteten Empfundenen Luftqualität von Azetonkonzentrationen

In Bild 5.1-9 beträgt bei der bewerteten Empfundenen Luftqualität von 7 dezipol die Häufigkeitsdichte ca. 0,22 und die wahrscheinliche Unzufriedenheit ca. 0,63. Das bedeutet, dass 63% der Probanden, die die Empfundene Luftqualität 7 dezipol bestimmt haben, wahrscheinlich unzufrieden sind. Betrachten wir z.B. die bewertete Empfundene Luftqualität von 6 dp, beträgt die wahrscheinliche Unzufriedenheit ca. 37%. Der Prozentsatz Unzufriedener für diese Verteilung kann durch eine Multiplikation der Dichtefunktion der bewerteten Empfundenen Luftqualität mit der dazu gehörenden wahrscheinlichen Unzufriedenheit und anschließender Integration des errechneten Betrags über den gesamten dezipol-Bereich berechnet werden.

5.2 Die Methode zur Diskretisierung der stetigen Normalverteilung

Die Multiplikation zweier stetiger Funktionen kann numerisch gelöst werden. Dabei werden die stetige Dichtefunktion und die stetige S-Funktion in diskrete Segmente mit äquidistanten Abständen zerlegt, so dass der gesamte Bereich der Verteilung gleichermaßen berücksichtigt wird. In unserem Fall werden die diskreten Beträge der S-Funktion und die diskreten Beträge der Dichtefunktion miteinander multipliziert. Die diskreten Produkte werden anschließend aufaddiert. Die Summe der segmentweise multiplizierten Beträge soll dem Betrag nach dem Integral der multiplizierten stetigen Funktionen entsprechen.

Theoretisch erreicht die Normalverteilung niemals die Abszisse, sondern nähert bei $-\infty$ und $+\infty$ asymptotisch unendlich klein der Abszisse an. Den unendlich großen Bereich der Normalverteilung in eine endliche Anzahl zu segmentieren, ist mathematisch nicht möglich. Daher wird zuerst der Bereich, den wir zur Segmentierung berücksichtigen wollen, festgestellt. Bei der Normalverteilung erreicht die integrierte Häufigkeitsdichte im Bereich von $\mu - 3\sigma$ bis $\mu + 3\sigma$ ca. den Betrag von 99,73%. Wir wählen diesen Bereich als den Ansatzpunkt zur Segmentierung.

$$\sum_{i=1}^{n} f(x_i) \cong \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} f(x)dx \cong 1 \qquad \text{(Gl. 5.2-1)}$$

mit $f(x_i)$; Segmentierte Häufigkeitsdichte der Dichtefunktion
$f(x)$; Dichtefunktion

Da eine stetige Kurve mathematisch als die Sammlung von unendlich vielen Punkten betrachtet wird, muss zweitens die geeignete Anzahl der Segmente ermittelt werden. So wird als Bedingung zur Ermittlung der Anzahl der Segmentierung festgelegt, dass die Summe der segmentierten Häufigkeitsdichten gleich groß dem Integral der stetigen Dichtefunktion sein muss. Da das Integral der Normalverteilung im gesamten Bereich 1 beträgt, kann man unter der Vernachlässigung der integrierten Größe von 0,27% die Bedingungen mit Hilfe von folgender Gleichung mathematisch beschreiben, wenn man zur Segmentierung den Bereich von $\mu \pm 3\sigma$ betrachtet:

$$B = (\mu \pm 3\sigma) \qquad \text{(Gl. 5.2-2)}$$

mit B: Breite des zu segmentierenden Intervalls um den Mittelwert der Verteilung

μ: Mittelwert

σ: Standardabweichung der zu segmentierenden Verteilung

Eine sinnvolle Anzahl der Segmente lässt sich durch folgende Überlegung gewinnen: Am einfachsten ist die, die keine Umrechnungsfaktoren erfordert. Dies ist der Fall, wenn die Segmente eine Einheit breit sind, und ihre Anzahl der Breite des zu segmentierenden Intervalls entspricht. Dann bedeckt ihre Fläche mit guter Näherung die Fläche des Integrals. Dies ist bei eine Normalverteilung bei sinnvollem Maßstab gegeben:

$$n = 6\sigma \text{ ; wenn } \sigma \geq 0{,}7 \text{ ist.} \qquad \text{(Gl. 5.2-3)}$$

mit n: Anzahl der Segmente

σ: Standardabweichung der zu segmentierenden Verteilung

Die Anzahl der Segmente und die Breite des zu segmentierenden Intervalls steigen proportional mit der Standardabweichung. So sei z.B. angenommen, dass sich die Empfundenen Luftqualitäten eines Probandenkollektivs um den Mittelwert von 5,5 dezipol normal verteilen und die Standardabweichung der Verteilung 1,5 dezipol

betrage. Nach Gleichung 5.2-2 muss die Dichtefunktion über eine gesamte Breite von 9 dezipol, d.h. ausgehend vom Mittelwert in jede Richtung 4,5 dezipol und nach Gl. 5.2-3 in 9 Segmente aufgeteilt werden. Dann entspricht die Summe der segmentweise betrachteten Häufigkeitsdichten dem Integral der Dichtefunktion von [N(5,5;1,5)] (siehe Bild 5.2-1).

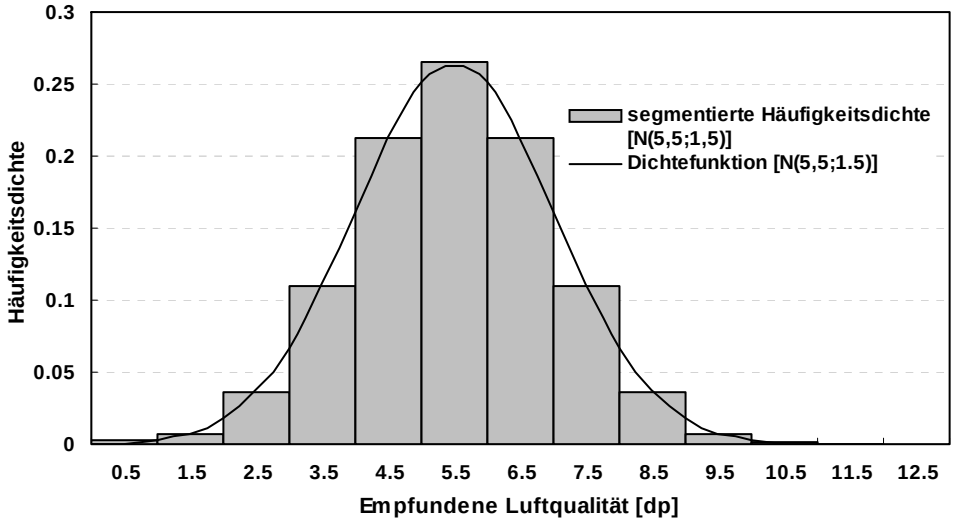

Bild 5.2-1: Die segmentierte Häufigkeitsdichte zur Ermittlung der Summenhäufigkeitsfunktion

Die Verteilung kann unendlich fein segmentiert werden. In diesem Fall ist die Summe der segmentierten Häufigkeitsdichte unendlich groß. Werden die segmentierten Intervalle zu klein gewählt, übersteigt die Summe der segmentierten Häufigkeitsdichte den Wert 1. Im umgekehrten Fall ergibt sich eine Summe kleiner als 1.

Wenn die Standardabweichung einer Normalverteilung kleiner als 0,7 ist, kann eine einzig betrachtete Häufigkeitsdichte größer als 1 sein. Deswegen wird die Anwendung der Gleichungen 5.2-3 auf $\sigma \geq 0{,}7$ begrenzt. Theoretisch ist die Häufigkeitsdichte in der Mitte mit der Standardabweichung $\sigma = 0$ unendlich groß.

Die segmentweise betrachtete Häufigkeitsdichte der Verteilung wird mit der wahrscheinlichen Unzufriedenheit, die bei der betrachteten Empfundenen Luftqualität der S-Funktion entspricht, multipliziert und aufaddiert. Die segmentweise betrachtete wahrscheinliche Unzufriedenheit wU_i (wahrscheinliche Unzufriedenheit bei der i-ten betrachteten Empfundenen Luftqualität) kann man für

den repräsentativen Wert der benachbarten i-ten wahrscheinlichen Unzufriedenheiten, die im Bereich des stetigen Intervalls von $wU_{i-1}/2 < wU_i \leq wU_{i+1}/2$ liegen, halten. In Analogie dazu kann man die segmentweise betrachtete Häufigkeitsdichte f_i als die repräsentative Häufigkeitsdichte der benachbarten i-ten Häufigkeitsdichten, die im Bereich des stetigen Intervalls von $f_{i-1}/2 < f_i \leq f_{i+1}/2$ liegt, verstehen.

Die Dichtefunktion und die wahrscheinliche Unzufriedenheit in Bild 5.1-9 wurden gemäß Gl. 5.2-3 segmentweise zerlegt. Die für die gebildeten Segmente jeweils geltenden Werte beider Funktionen sind in Bild 5.2-2 punktförmig dargestellt.

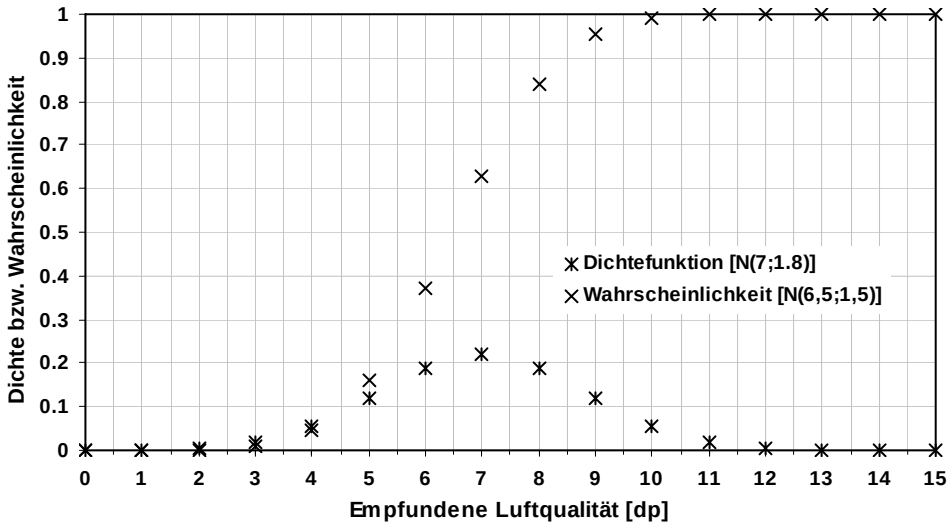

Bild 5.2-2: Die Segmentierung der Dichtefunktion und der wahrscheinlichen Unzufriedenheit

Durch die Multiplikation der jeweiligen in Bild 5.2-2 punktförmig dargestellten Wertepaare der Häufigkeitsdichte und der wahrscheinlichen Unzufriedenheit und Addition dieser Einzelwerte wird der Prozentsatz Unzufriedener für die bewerteten Empfundenen Luftqualitäten ermittelt. In der tabellarischen Darstellung in Tabelle 5.2-1 wird das Vorgehen bei der Ermittlung des Prozentsatzes Unzufriedener bei der Normalverteilung [N(7;1,8)] nochmals zum Verständnis verdeutlicht.

(1)	(2)	(3)	(4)
Segmentweise betrachtete Empfundene Luftqualität [dp]	Häufigkeitsdichte der betrachteten Empfundenen Luftqualität [N(7;1,8)]	Wahrscheinliche Unzufriedenheit bei der betrachteten ELQ [N(6,5;1,5)]	Multiplikation der Häufigkeitsdichte mit der wahrscheinlichen Unzufriedenheit (2)*(3)
0	0,000115245	7,34892E-06	8,46923E-10
1	0,000856822	0,000122899	1,05303E-07
2	0,004678630	0,001349967	6,31600E-06
3	0,018763139	0,009815307	0,000184166
4	0,055265077	0,047790330	0,002641136
5	0,119551367	0,158655260	0,018967453
6	0,189940163	0,369441404	0,070171761
7	0,221634600	0,630558596	0,139753602
8	0,189940163	0,841344740	0,159805157
9	0,119551367	0,952209670	0,113837968
10	0,055265077	0,990184693	0,054722633
11	0,018763139	0,998650033	0,018737810
12	0,004678630	0,999877101	0,004678055
13	0,000856822	0,999992651	0,000856815
14	0,000115245	0,999999713	0,000115245
15	1,13844E-05	0,999999993	1,13844E-05
SUMME	**0,99**		**0,58**

Tabelle 5.2-1: Darstellung des Vorgehens bei der Ermittlung des Prozentsatzes Unzufriedener bei einer Normalverteilung der bewerteten Empfundenen Luftqualität

Die Spalte (1) bezeichnet die segmentweise betrachteten Empfundenen Luftqualitäten. Die Spalte (2) zeigt die Häufigkeitsdichte, die dem Wert der Dichtefunktion der normalverteilten Empfundenen Luftqualität entspricht. Die Summe der segmentweise (punktförmig) betrachteten Häufigkeitsdichte beträgt 0,99. Dieser Wert erfüllt die Bedingung für die Segmentierung in Gl. 5.2-1. In der Spalte (3) stehen die Werte der segmentweise (punktförmig) betrachteten S-Funktion für die wahrscheinliche Unzufriedenheit bei der betrachteten Empfundenen Luftqualität. In der Spalte (4) wird die Multiplikation der Häufigkeitsdichte mit der wahrscheinlichen Unzufriedenheit ermittelt. Die Summe über die Einzelmultiplikationen in Höhe von 0,58 steht für den Prozentsatz Unzufriedener der Verteilung [N(7;1,8)]. Die mittlere Empfundene Luftqualität $\mu = 7$ dezipol repräsentiert das zentrale Maße der bewerteten Empfundenen Luftqualität mit der Normalverteilung von [N(7;1,8)]. Daher kann man sagen, dass bei der mittleren Empfundenen Luftqualität von 7 dezipol für die Azetonkonzentration ca. 58% der Probanden unzufrieden sind.

Vereinfachung von Gl. 5.2-2 und Gl. 5.2-3 bei der Anwendung

Da die Anzahl der Segmente und die Gesamtbreite des segmentierten Bereichs gleich groß sind, folgen die Werte in Spalte (1) einem einfachen Bildungsgesetz: Der Wert der Empfundenen Luftqualität wird schrittweise um 1 dezipol angehoben. Beträgt z.B. die mittlere Empfundene Luftqualität 7,1 dezipol, beginnt die Wertereihe mit 0,1 und setzt sich mit den Werten 1,1 dezipol, 2,1 dezipol, ..., 7,1 dezipol, ... +31,1 dezipol.

Die Summe über die segmentiere Dichtefunktion beträgt ca. 99% des Wertes, der sich durch Integration der stetigen Dichtefunktion errechnet. Die Normalverteilung der bewerteten Empfundenen Luftqualität in Tabelle 5.2-1 hat die Standardabweichung von 1,8 dezipol. Nach Gl. 5.2-3 soll die in die Berechnung einbezogene Gesamtbreite ca. 12 dezipol betragen. In diesem Beispiel müssen also die Empfundenen Luftqualitäten von (7 – 6 = 1) dezipol bis (7 + 6 = 13) dezipol berücksichtigt werden. Weil die Summe der Multiplikationen außerhalb dieses Bereiches vernachlässigbar klein ist, kann man bei der Ermittlung des Prozentsatzes Unzufriedener diese Werte mit in Berechnung einbeziehen (siehe Tab. 5.2-1, die Multiplikationswerte für die bewertete Empfundene Luftqualität bei 0 dezipol, 14 dezipol und 15 dezipol).

Das Vorgehen zur Ermittlung des Prozentsatzes Unzufriedener in Tab. 5.2-1 lässt sich mit folgender Formel mathematisch beschreiben:

$$PD = \sum_{i=1}^{n} \left(f(x_i) \cdot P(x_i) \right) \cdot 100 \qquad \text{(Gl. 5.2-4)}$$

mit $f(x_i)$: segmentierte (punktförmige) Häufigkeitsdichte der bewerteten ELQ
$P(x_i)$: segmentierte (punktförmige) Summenhäufigkeitsfunktion bei der betrachteten ELQ.

Dabei wird die Dichte für $f(x_i)$ mit folgender Gleichung ermittelt:

$$f(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{(x_i-\mu)^2}{2\sigma^2}} \qquad \text{(Gl. 5.2-5)}$$

mit x_i : Die bewerteten einzelnen Empfundenen Luftqualitäten als Variable
σ : Standardabweichung der bewerteten ELQ
μ : Mittelwert der bewerteten ELQ

Die wahrscheinliche Unzufriedenheit für $P(x_i)$ wird wie folgt ermittelt:

$$P(x_i) = \int_{-\infty}^{x_i} g(x_i)dx \qquad \text{(Gl. 5.2-6)}$$

mit x_i : Variable für die Normalverteilung von [N(6,5;1,5)]
$g(x_i)$: Dichtefunktion der Normalverteilung von [N(6,5;1,5)]
$P(x_i)$: segmentierte Summenhäufigkeitsfunktion

Die Dichtefunktion $g(x_i)$ wird wiederum wie folgt ermittelt:

$$g(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot (1{,}5)^2}} \cdot e^{-\frac{(x_i - 6{,}5)^2}{2 \cdot (1{,}5)^2}} \qquad \text{(Gl. 5.2-7)}$$

mit x_i : Variable für die Normalverteilung von [N(6,5;1,5)]
1,5 : Standardabweichung der Verteilung von [N(6,5;1,5)]
6,5 : Mittelwert der Verteilung von [N(6,5;1,5)].

Wenn man die mittlere Empfundene Luftqualität als einen repräsentativen Wert der Verteilung abhängig von der Geruchsstoffkonzentration bezeichnet und schrittweise von 0 dezipol bis zu 15 dezipol erhöht und den dazu gehörigen Prozentsatz Unzufriedener nach der Gleichung 5.2-4 ermittelt, kann man eine Wertereihe wie in Bild 5.2-3 ermitteln. Der Prozentsatz Unzufriedener in Höhe von ca. 58% bei einer Empfundenen Luftqualität von 7 dezipol - wie in Tabelle 5.2-1 ermittelt – wurde in Bild 5.2-3 hervorgehoben.

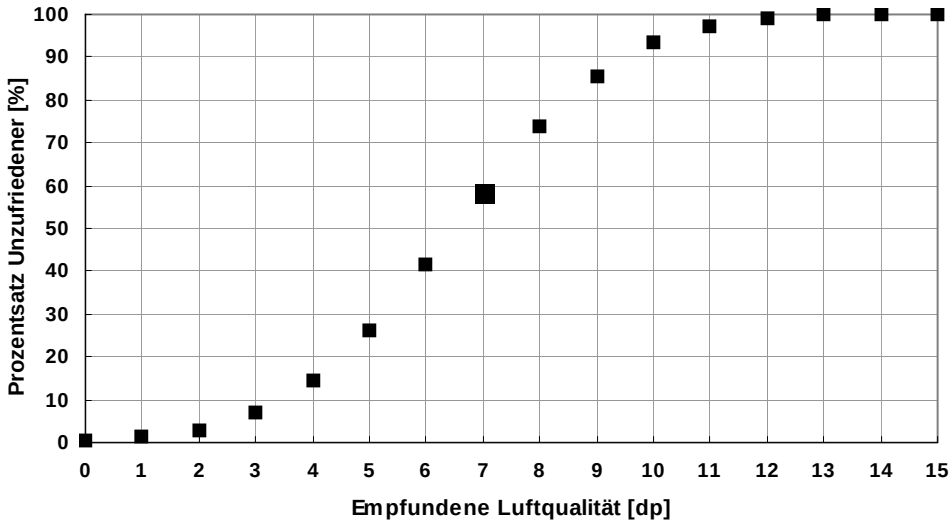

Bild 5.2-3: Zusammenhang zwischen der Empfundenen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener

Durch die Verbindung der nebeneinander liegenden Werte kann man die Funktion des Zusammenhangs zwischen der mittleren Empfundenen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener ermitteln.

5.3 Die Ermittlung des neuen Zusammenhangs zwischen ELQ und PD

Die in Bild 5.2-3 dargestellten Werte nähern sich dem Verlauf der S-Funktion für die Normalverteilung von [N(6,5;2,3)] an. Die Werte, die den Prozentsatz Unzufriedener für die mittlere Empfundene Luftqualität widerspiegeln, und die Summenhäufigkeitsfunktion der Normalverteilung von [N(6,5;2,3)] werden vergleichend in Bild 5.3-1 dargestellt.

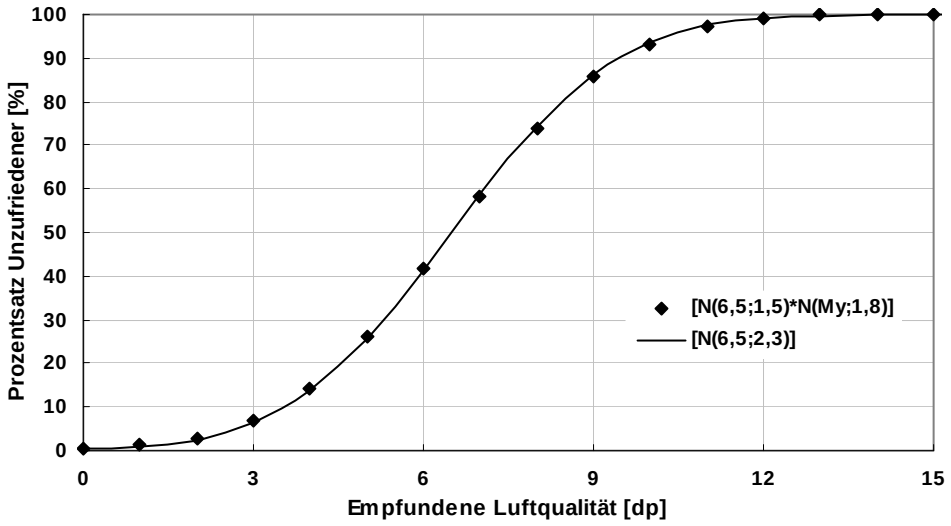

Bild 5.3-1: Die Summenhäufigkeitsfunktion, die den Zusammenhang zwischen der Empfundenen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedenheit darstellt.

Zur Ermittlung der Näherungskurve wurde bei konstantem Mittelwert μ = 6,5 dezipol die Standardabweichung schrittweise erhöht. Auf diese Weise wurde festgestellt, dass die Werte auf der Summenhäufigkeitsfunktion der Normalverteilung von [N(6,5;2,3)] liegen. Die Standardabweichung für diese Summenhäufigkeitsfunktion kann man aus den beiden Standardabweichungen, σ_1 = 1,5 dezipol für die wahrscheinliche Unzufriedenheit und σ_2 = 1,8 dezipol für die bewertete Empfundenen Luftqualität, wie folgt mathematisch ermitteln:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \qquad \text{(Gl. 5.3-1)}$$

mit σ_1 ; Standardabweichung für die wahrscheinliche Unzufriedenheit

σ_2 ; Standardabweichung für die bewertete Empfundene Luftqualität

Im Allgemeinen kann man demnach die Summenhäufigkeitsfunktion in Bild 5.1-3 als Resultat aus der Sprungfunktion bei einer Standardabweichung σ_1 = 0 dezipol sowie der bewerteten Empfundenen Luftqualität bei einer Standardabweichung σ_2 = 1,8 dezipol betrachten. In gleicher Weise ist dies für das Kriterium der Akzeptanzbestimmung nach 20-Punkt-Verfahren gültig (siehe Kap. 4).

5.4 Der Einfluss der Standardabweichung auf den Zusammenhang zwischen ELQ und PD

Über den Einfluss der Standardabweichung auf den Zusammenhang zwischen der mittleren Akzeptanz und dem Prozentsatz Unzufriedener wurde in Kapitel 4 eingegangen. In der Praxis sind die Standardabweichungen der Verteilungen der bewerteten Empfundenen Luftqualitäten nicht konstant. Sie schwanken abhängig vom Probandenkollektiv und vom Stoff mehr oder weniger. Die Schwankungen der Standardabweichung darf trotzdem nicht so groß sein, dass dadurch die Repräsentativität des Probandenkollektives für die Grundgesamtheit beeinträchtigt werden kann.

Wenn man weiß, welche Determinanten für das zu untersuchende Merkmal wichtig sind, kann man die geschichtete Stichprobe, also die trainierten Probanden, zur Bestimmung der Empfundenen Luftqualität einsetzen. Das zu untersuchende Merkmal ist beim dezipol-Verfahren die Wiederholung der Geruchsintensität nach dem Vergleich mit den Meilensteinen mit möglichst kleiner Abweichung voneinander. Wenn die Azetonkonzentration von 10 ppm nach dem dezipol-Verfahren bestimmt werden muss, müssen die Probanden die Konzentration nach Gl. 3.4-9 möglichst nah der Empfundenen Luftqualität von 3,04 dezipol bestimmen. Die trainierten Probanden können genauer als die untrainierten Probanden die Empfundene Luftqualität bestimmen. Dadurch entsteht die große Differenz der Standardabweichung. Leicht kann dies festgestellt werden, wenn man die

Standardabweichung des trainierten Probandenkollektivs mit der des untrainierten vergleicht. Die Differenz der Standardabweichung wird durch die Auswahl und das Training des Probandenkollektivs verursacht.

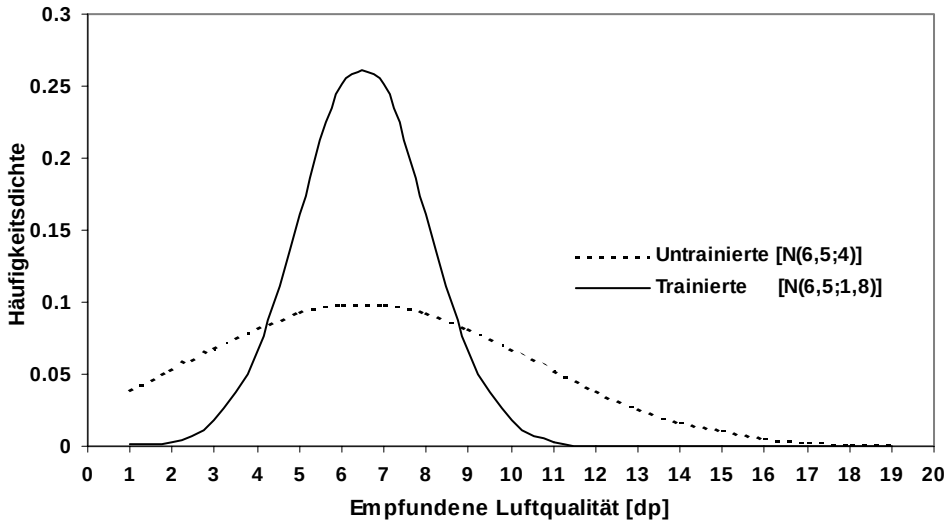

Bild 5.4-1: Zwei unterschiedliche Dichtefunktion bei untrainiertem (Finke & Fitzner, 1994) und trainiertem (Spiess, 1998) Probandenkollektiv

Aus der Messdaten, die von Finke & Fitzner (1994) zur Bestimmung der Empfundenen Luftqualität der Azetonkonzentration durch ein untrainiertes Probandenkollektiv ermittelt wurden, wird die Standardabweichung $\sigma_2 = 4$ dezipol ermittelt. Durch Einsatz eines trainierten Probandenkollektives ermittelte Spiess (1998) eine durchschnittliche Standardabweichung $\sigma_2 = 1{,}8$.

Nach Gl. 5.3-1 beträgt nun die Standardabweichung für das untrainierte Probandenkollektiv $\sigma = 4{,}27$ dezipol und für das trainierte $\sigma = 2{,}3$ dezipol. Die Summenhäufigkeitsfunktionen für beide Fälle werden in einem Diagramm zusammen dargestellt (siehe Bild 5.4-2).

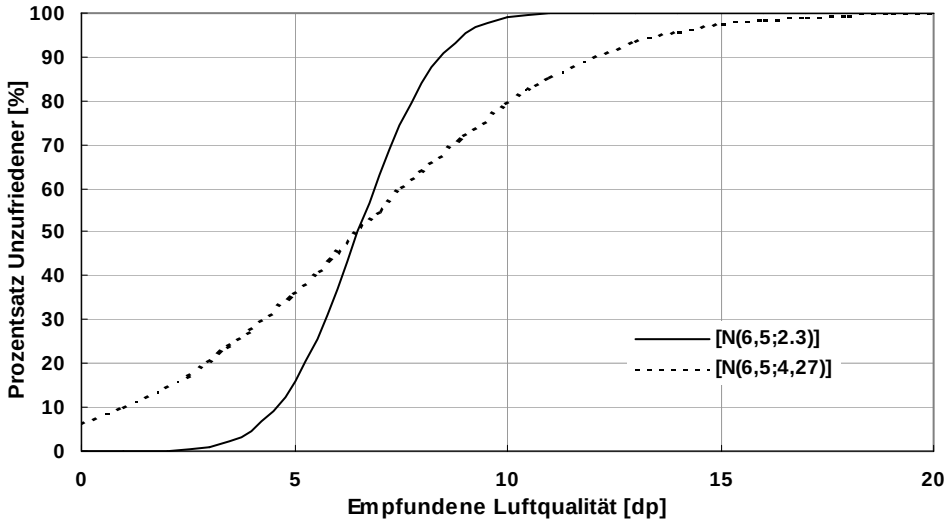

Bild 5.4-2: Summenhäufigkeitskurven für [N(6,5;2,3)] und [N(6,5;4,27)] als Zusammenhänge zwischen der mittleren Empfundenen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener

Die trainierten Probanden weisen im Vergleich zu den untrainierten Probanden eine sehr feine Differenzierungsfähigkeit und eine relativ dispersionsarme Wiedergabe der zu bewertenden Azetonkonzentrationen in dezipol-Werten auf. Die unterschiedlichen Kurvenverläufe verdeutlichen, dass sich durch die verschiedenen Standardabweichungen andere Zusammenhänge zwischen der mittleren Empfundenen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener ergeben. Um zu zeigen, wie groß der Unterschied des Prozentsatzes Unzufriedener ausfallen kann, wenn man die Standardabweichung bei der Ermittlung des Prozentsatz Unzufriedener nicht berücksichtigt, wird die Differenz des Prozentsatzes Unzufriedener zwischen den beiden Probandenkollektiven in Bild 5.4-3 im Bereich der mittleren Empfundenen Luftqualität von 0 dezipol bis 20 dezipol aufgetragen.

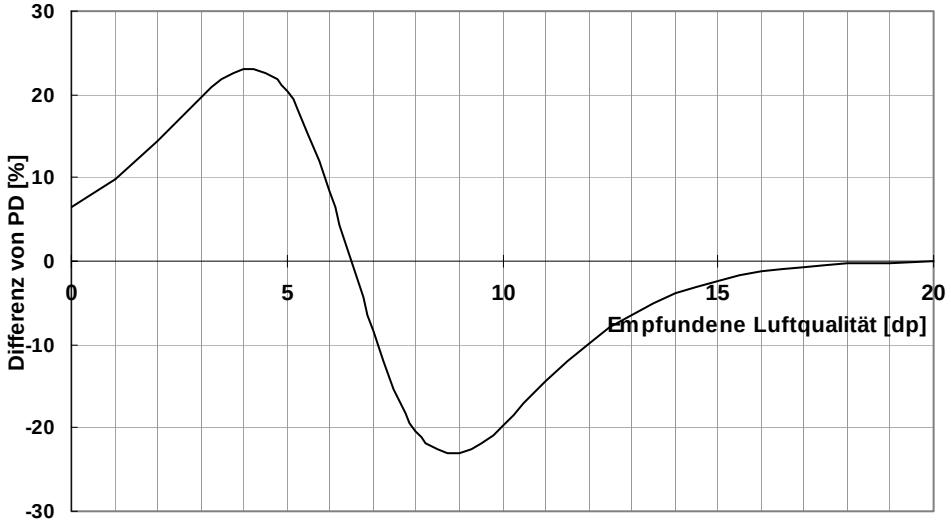

Bild 5.4-3: Die Differenz des Prozentsatzes Unzufriedener zwischen trainierter und untrainierter Probandengruppe durch die Auswahl und das Training der Probanden (σ = 2,3 dezipol und σ = 4,27 dezipol)

Wenn bei der Bestimmung der Azetonkonzentration nach dem dezipol-Verfahren die Standardabweichung eines Probandenkollektivs durch die Auswahl und das Training von σ = 4 dezipol auf σ = 1,8 dezipol reduziert wird, können die Prozentsätze Unzufriedener um bis zu ca. 23 % voneinander abweichen. Die Standardabweichung muss man deswegen bei der Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der mittleren Empfundenen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener unbedingt berücksichtigen.

5.5 Die S-Funktion der wahrscheinlichen Unzufriedenheit für die Raumluftqualität am HRI

Zur Untersuchung des Einflusses der Raumlufttechnischen Anlagen wurde von Bitter (2001) die Luftqualität in den Innenräumen des Hermann-Rietschel-Instituts mit einem trainierten Probandenkollektiv bewertet. Anders als die Geruchsuntersuchungen der Azetonkonzentration im Labor können den Testpersonen bei der Bewertung der Empfundenen Luftqualität in den Innenräumen keine Vergleichsproben aus Azeton dargeboten werden.

Die tabellarische Darstellung der wahrscheinlichen Unzufriedenheit

Die zu beurteilenden Büroräume waren zum Teil mit Personen besetzt und in normaler Nutzung. Die Bewertung erfolgte nach dem ersten Eindruck, noch bevor

eine Adaptation des Geruches erfolgen konnte. Das trainierte Probandenkollektiv bewertete die Luftqualität direkt in der Einheit dezipol. Zusätzlich wurden die Personen gebeten eine Akzeptanzbewertung (ja/nein) abzugeben. Die wahrscheinliche Unzufriedenheit, die aus den bei der Bestimmung der Raumluftqualität im Hermann-Rietschel-Institut erhobenen Daten ermittelt wurde, wird in Tabelle 5.5-1 dargestellt. Das Verfahren zur Ermittlung der wahrscheinlichen Unzufriedenheit wurde in Kap. 5.1.2 bereits erwähnt.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
dezipol-Wertung [dp]	Häufigkeit der Wertung von „akzeptabel“	3 gliedriger gleitender Durchschnitt der Häufigkeit „akzeptabel“	Häufigkeit der Wertung von „nicht akzeptabel“	3 gliedriger gleitender Durchschnitt der Häufigkeit „nicht akzeptabel“	Wahrscheinliche Unzufriedenheit [%] =(5)/((3)+(5))*100
0,0	34	25,7	0	0,0	0,0
0,5	33	61,0	0	0,0	0,0
1,0	116	55,0	0	0,3	0,6
1,5	16	62,0	1	0,3	0,5
2,0	54	25,3	0	0,3	1,3
2,5	6	68,0	0	1,0	1,4
3,0	144	55,0	3	1,0	1,8
3,5	15	125,3	0	4,0	3,1
4,0	217	84,0	9	4,0	4,5
4,5	20	163,0	3	20,0	10,9
5,0	252	94,0	48	18,3	16,3
5,5	10	150,3	4	41,3	21,6
6,0	189	68,0	72	29,0	29,9
6,5	5	101,7	11	69,3	40,5
7,0	111	39,7	125	49,0	55,3
7,5	3	69,0	11	123,7	64,2
8,0	93	32,7	235	88,0	72,9
8,5	2	43,7	18	147,3	77,1
9,0	36	13,0	189	71,7	84,6
9,5	1	22,0	8	146,3	86,9
10,0	29	10,0	242	85,3	89,5
10,5	0	12,3	6	118,3	90,6
11,0	8	2,7	107	35,7	93,0
11,5	0	5,7	6	117,0	95,4
12,0	9	3,3	238	83,7	96,2
12,5	1	3,3	7	127,3	97,4
13,0	0	0,3	137	48,0	99,3
Summe	1404	-	1480	-	-

Tabelle 5.5-1: Die Häufigkeit der Zufrieden-/Unzufriedenheit bei der bewerteten Empfundenen Luftqualität von HRI-Räumen

Die graphische Darstellung der wahrscheinlichen Unzufriedenheit

Durch die graphische Darstellung kann man die wahrscheinliche Unzufriedenheit noch anschaulicher darstellen. In Bild 5.5-1 wird sie graphisch dargestellt.

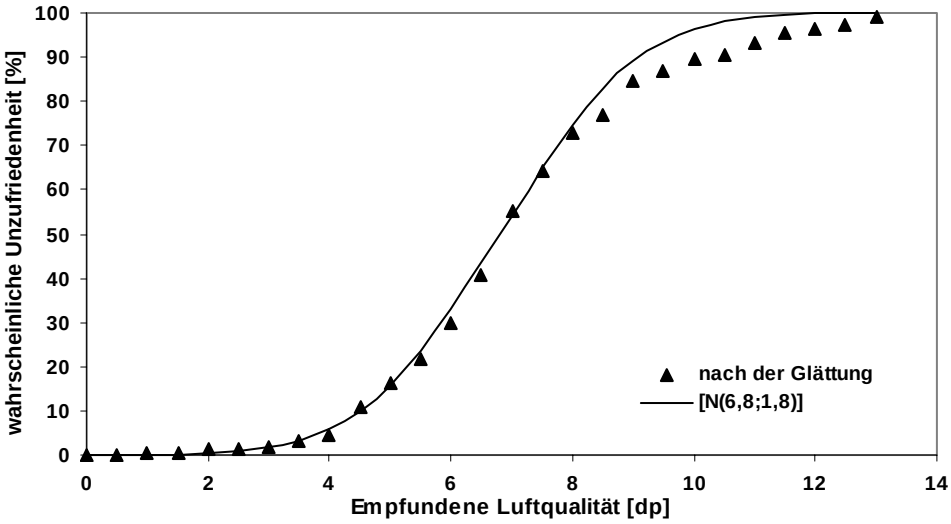

Bild 5.5-1: Die wahrscheinliche Unzufriedenheit bei den bewerteten Empfundenen Luftqualitäten von HRI-Räumen

Die Kurve der Summenhäufigkeitsfunktion der wahrscheinlichen Unzufriedenheit für die Azetonkonzentration in Bild 5.1-7 nähert sich stark an die Summenhäufigkeitsfunktion, die durch das Integral der Dichtefunktion, die den Mittelwert μ = 6,8 dezipol und die Standardabweichung σ = 1,8 dezipol hat, an. Zum Vergleich werden beide Summenhäufigkeitsfunktionen für die Azetonkonzentration und für die Innenräume im HRI in Bild 5.5-2 zusammen dargestellt.

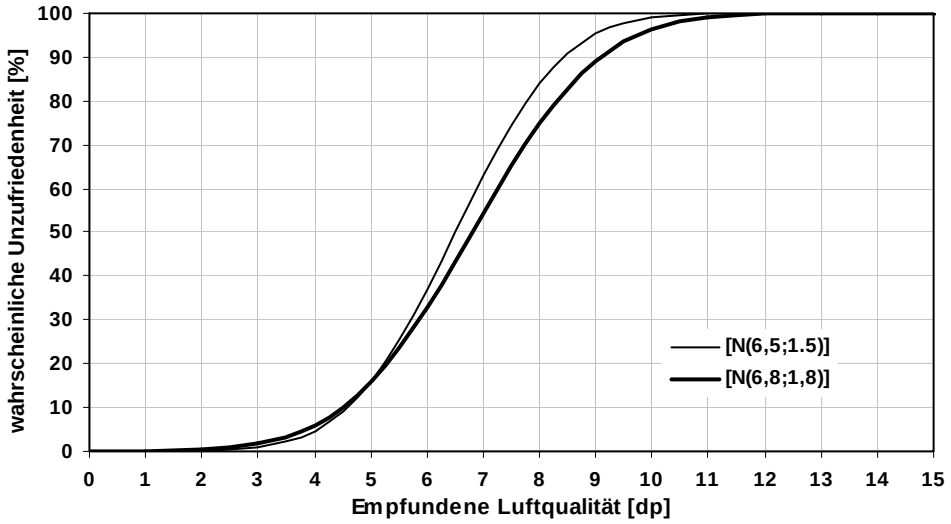

Bild 5.5-2: Die Summenhäufigkeitsfunktionen der wahrscheinlichen Unzufriedenheit für die Azetonkonzentration [N(6,5;1,5)] und für die Innenräume im HRI [N(6,8;1,8)]

Der Vergleich der Summenhäufigkeitsfunktion der wahrscheinlichen Unzufriedenheit für die Azetonkonzentration mit der für die Innenräume im HRI zeigt, dass die Summenhäufigkeitsfunktion für die Innenräume um 0,3 dezipol nach rechts verschoben ist und eine um 0,3 dezipol größere Standardabweichung hat.

Die Differenz der wahrscheinlichen Unzufriedenheiten für die Azetonkonzentration und für die Innenräume im HRI wird in Bild 5.5-3 dargestellt.

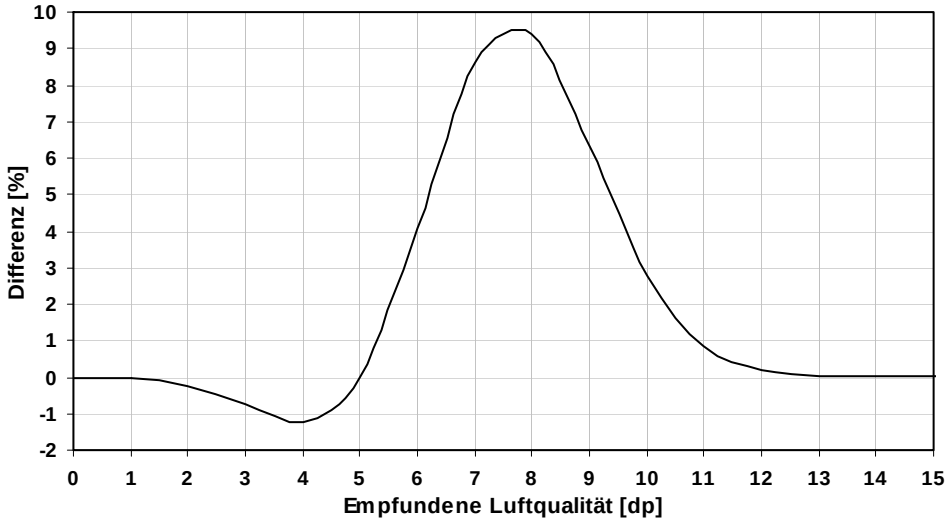

Bild 5.5-3: Die Differenz der wahrscheinlichen Unzufriedenheit für die Azetonkonzentration und für die Innenräume des HRI

Im gesamten bewerteten Empfundenen Luftqualitätsbereich ist die Differenz kleiner als 10%. Das Maximum der Differenz liegt mit ca. 9,5% bei der Empfundenen Luftqualität von 8 dezipol. Die Differenz der Summenhäufigkeitsfunktionen für die beiden Geruchsarten (Azetonkonzentration und Innenräume) ist im Bereich von 0 dezipol und bis 6 dezipol vernachlässigbar klein.

Man kann daraus ableiten, dass der Geruchseindruck der Raumluft ähnlich dem Geruchseindruck der Azetonkonzentration ist. Daraus lässt sich wiederum schlussfolgern, dass das dezipol-Verfahren für die Bestimmung der Raumluftqualität gut geeignet ist.

6 Vergleich der Fanger´schen Gleichung mit der S-Funktion

Der Zusammenhang zwischen der Empfundenen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener wurde von Fanger zur Bestimmung der Luftqualität eingeführt und mit einer Exponentialfunktion dargestellt (siehe Gl. 3.4-3). Obwohl das dezipol-Verfahren auf der Fanger'schen Exponentialfunktion basiert und skaliert wird, kann man zwischen beiden Funktionen eine sehr große Differenz bezogen auf den Zusammenhang zwischen der Empfundenen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener feststellen. In diesem Kapitel wird auf die Differenz und deren Ursache eingegangen.

Beim Vergleich beider Funktionen miteinander, ergibt sich die Schwierigkeit, die - abhängig vom verwendeten Verfahren - unterschiedlichen Anforderungen zu interpretieren (siehe Tab. 2.1-1). In Bild 6.1-1 sind die Fanger'sche Exponentialfunktion und die Summenhäufigkeitsfunktion der Normalverteilung von [N(6,5;2,3)], die für das trainierte Probandenkollektiv bei der Bestimmung der Azetonkonzentration ermittelt wurde, dargestellt.

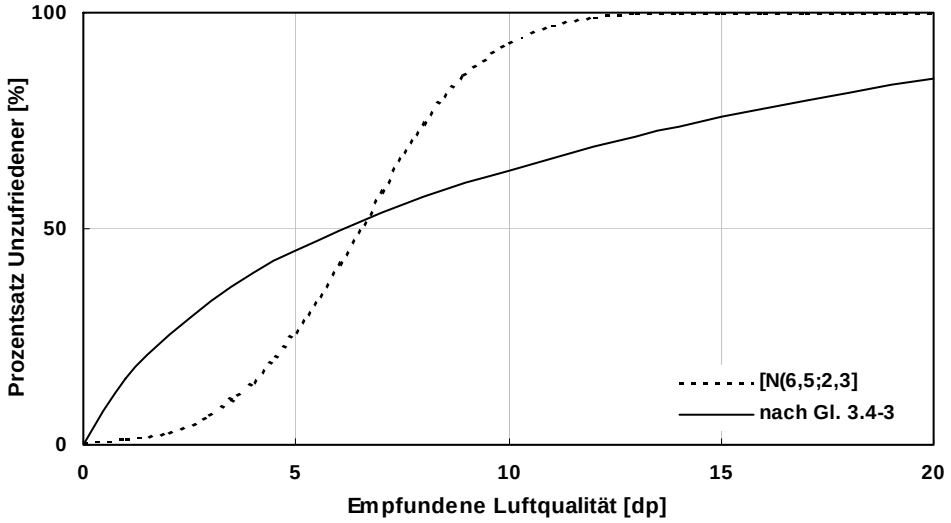

Bild 6.1-1: Vergleich der Fanger'schen Funktion mit der rechnerisch ermittelten Verteilungsfunktion für trainierte Probanden

Die Folge: zu jedem dezipol-Wert können zwei Prozentsätze Unzufriedener angegeben werden. Besonderes Interesse gilt dem Bereich zwischen 10% - 30% Unzufriedener. Dieser Bereich ist nach DIN 1946-2 in Innenräumen zulässig. So lässt bei gleicher Empfundener Luftqualität die Anwendung der Summenhäufigkeitsfunktion der Normalverteilung [N(6,5;2,3)] in diesem Bereich

eine deutlich geringere Zahl Unzufriedener erwarten als die Fanger'sche Gleichung (Gl. 3.4-3). So werden z.B. bei 3,5 dezipol mit der Summenhäufigkeitsfunktion 10% statt 37% Unzufriedene ermittelt. Bei der Beurteilung äußerst schlechter Luftqualität kehrt sich das Ergebnis aus beiden Funktionen um. So kann mit der Summenhäufigkeitsfunktion ab einer Empfundenen Luftqualität von 8 dezipol ein Prozentsatz Unzufriedener zwischen 80% - 100% erwartet werden. Nach der Fanger'schen Gleichung hingegen wird diese hohe Zahl Unzufriedener erst ab 17 dezipol erwartet.

Da das Training der Probanden die Streuung der Versuchsergebnisse beeinflusst, vergleichen wir hier die Fanger'sche Gleichung (Gl. 3.4-3) mit der Summenhäufigkeitsfunktion der Normalverteilung von [N(6,5;4,27)], die für das untrainierte Probandenkollektiv bei der Bestimmung der Azetonkonzentration ermittelt wurde.

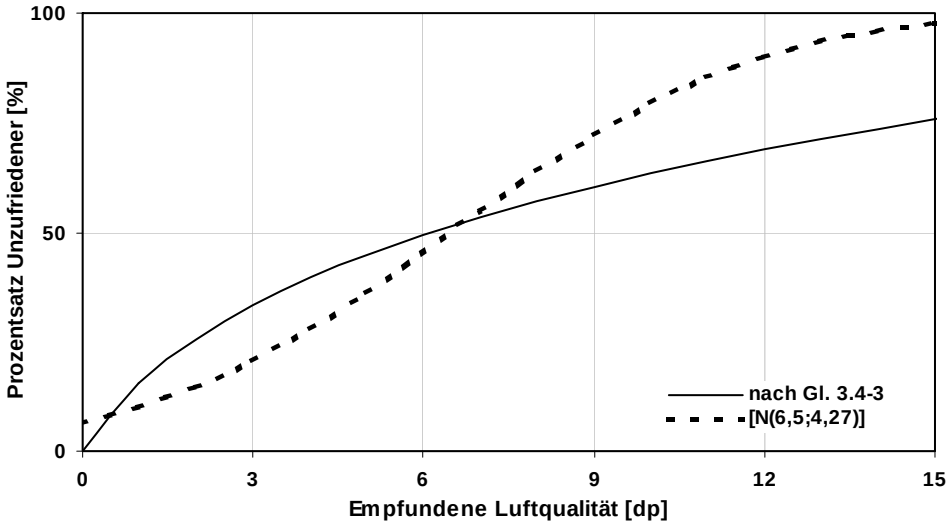

Bild 6.1-2: Vergleich der Fanger'schen Funktion mit der rechnerisch ermittelten Verteilungsfunktion für untrainierte Probanden

Beide Funktionen nähern sich deutlich erkennbar an. Die Übereinstimmung der Funktionen ist größer als bei trainierten Probanden (siehe Bild 6.1-1). Man kann daraus schließen, dass die Standardabweichung einen maßgeblichen Einfluss auf den funktionalen Zusammenhang zwischen Empfundener Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener hat.

Zwei Extremfälle an Standardabweichungen kann man sich dazu vorstellen: Wenn die Standardabweichung unendlich groß ist, verläuft die Summen-

häufigkeitsfunktion waagerecht. Ist die Standardabweichung unendlich klein, verläuft die Summenhäufigkeitsfunktion senkrecht, also einer Sprungfunktion gleichend. Beide Fälle sind schon wegen der beschränkten Skala und der individuell unterschiedlichen Interpretationen des Geruchseindrucks eher theoretische Fälle. In Bild 6.2-4 sind die zwei extremen Summenhäufigkeitsfunktionen dargestellt.

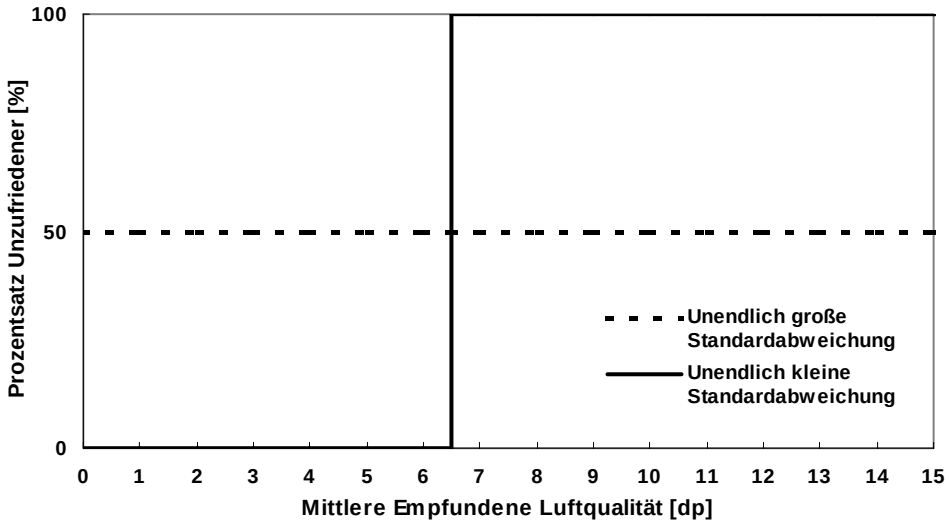

Bild 6.1-3: Summenhäufigkeitsfunktionen bei zwei extremen Standardabweichungen

Es scheint, dass die verschiedenen Standardabweichungen, d.h. die unterschiedlichen Differenzierungsfähigkeiten des trainierten und des untrainierten Probandenkollektives die Ursache für den Unterschied beider funktionaler Zusammenhänge sind. Damit ist aber noch nicht geklärt, ob das Verfahren einen Einfluss auf die Bestimmung der Empfundenen Luftqualität hat. Da die Fanger'sche Gleichung durch das untrainierte Probandenkollektiv und nach dem 2-Punkt-Verfahren, die S-Funktion durch das trainierte Probandenkollektiv und nach dem dezipol-Verfahren ermittelt wird, darf der Trainingseffekt nicht als einzige Ursache betrachtet werden.

Was passiert, wenn man statt der Summenhäufigkeitsfunktion, die für die wahrscheinliche Unzufriedenheit nach dem dezipol-Verfahren angewendet wird, die Fanger'sche Kurve als das Kriterium für die Zufrieden-/Unzufriedenheit verwendet? Zur Erklärung werden die Dichtefunktionen, [N(6,5;1,8)] für das trainierte Probandenkollektiv und [N(6,5;4,0)] für das untrainierte Probandenkollektiv angewendet. Durch einen Vergleich der unterschiedlichen Standardabweichungen kann ermittelt werden, ob die Standardabweichung

tatsächlich als einzige Ursache angeführt werden kann. Das Verfahren der segmentweisen Betrachtung wurde in Kap. 5. erklärt. Das Vorgehen läuft in Analogie zu Kap. 5. Der Unterschied liegt darin, dass hier die Fanger'sche Funktion statt der S-Funktion zum Kriterium für die Zufrieden-/Unzufriedenheit angewendet wird. Das Ergebnis ist in Bild 6.1-4 dargestellt.

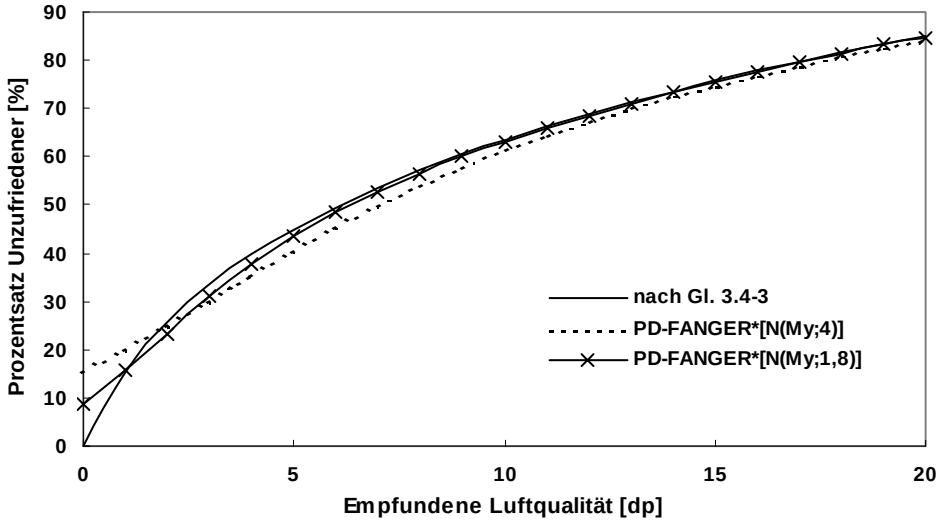

Bild 6.1-4: Summenprodukte aus Dichtefunktion [N(6,5;4)] und [N(6,5;1,8)] und der Fanger´schen Gleichung (Gl. 3.4-3 wird hier als die wahrscheinliche Unzufriedenheit betrachtet) zur Darstellung der Zusammenhänge zwischen der Empfundenen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener

Wenn man die Fanger´sche Gleichung zur Bestimmung der wahrscheinlichen Unzufriedenheit für die jeweils betrachtete Empfundene Luftqualität zugrunde legt, kann man feststellen, dass der Zusammenhang zwischen dem Prozentsatz Unzufriedener und der mittleren Empfundenen Luftqualität nur eine vernachlässigbar kleine Differenz zur Fanger'schen Gleichung 3.4-3 aufweist (siehe Bild 6.1-4).

Wie in Bild 6.1-4 dargestellt, bedeutet die Differenz, dass die Standardabweichung hier eine untergeordnete Rolle spielt. Weil die wahrscheinliche Unzufriedenheit die entscheidende Rolle bei der Ermittlung des Zusammenhangs zwischen dem Prozentsatz Unzufriedener und der mittleren Empfundenen Luftqualität spielt, liegt die Vermutung nahe, dass die große Differenz zwischen der Fanger'schen Kurve und der S-Funktion womöglich nicht auf die Standardabweichung sondern auf die verschiedenen Messverfahren zurückzuführen ist. Der Versuch einer Erklärung wird dazu in Kapitel 7 gegeben.

7 Vergleich der unterschiedlichen Bestimmungsverfahren

7.1 Differenz der Empfundenen Luftqualität abhängig von den Messverfahren

Die Empfundene Luftqualität nach dem 2-Punkt-Verfahren und die Empfundene Luftqualität nach dem dezipol-Verfahren unterscheiden sich, obwohl die Meilensteine nach dem 2-Punkt-Verfahren festgelegt und als Standardskalierung für das dezipol-Verfahren verwendet werden. Im folgenden Kapitel werden die unterschiedlichen Messergebnisse miteinander verglichen und die Ursache für die Abweichung der Messergebnisse erklärt.

7.1.1 Differenz des Messergebnisses beim untrainierten Probanden

Zur Auswertung der Messdaten, die wegen der interindividuell und intraindividuell unterschiedlich wahrgenommenen Empfindungen unterschiedlich angegeben sind, müssen zunächst zwei repräsentative Maße, die zentrale Tendenz und das Dispersionsmaß, ermittelt werden. Aus beiden Werten kann man dann die Merkmalsausprägung der einzelnen Bewertungen des Probandenkollektives bilden.

Wenn man eine Verteilung als Normalverteilung annimmt, spielt die Art der Mittelwertbildung keine Rolle, da die Werte, das arithmetische Mittel, der Medianwert und der Modalwert, wegen der symmetrischen und glockenförmigen Verteilungseigenschaft unabhängig von der Art der Mittelwertbildung zu einem Wert führen. Die Bewertungen der Empfundenen Luftqualität sind jedoch nicht in idealer Weise verteilt, sondern entsprechen nur in Näherung einer Normalverteilung. Daher verteilen sich die tatsächlich angegebenen Empfundenen Luftqualitäten mehr oder weniger abweichend von der idealen Normalverteilung.

Bei unsymmetrischer Verteilung sind die Mittelwerte abhängig von der Art der Mittelwertermittlung unterschiedlich groß. Man kann daher durch das Vergleichen der unterschiedlich großen Mittelwerte miteinander die Stärke der Verformung, also die Schiefe der Verteilung, feststellen, ob sie linkssteil, symmetrisch oder rechtssteil ist (siehe Kap. 3.3).

Vor der Auswahl von Probanden nimmt eine Menge von naiven, also untrainierten, Personen an der Bewertung der Luftqualität teil. Sie bewerten die Azetonkonzentration nach dem dezipol-Verfahren direkt in der Einheit dezipol.

Man kann daraus die zentrale Tendenz und das Dispersionsmaß ermitteln. In Tabelle 7.1-1 sind die Messdaten, die beim EG-AUDIT-Projekt (Deutschland) von Finke & Fitzner (1994) gemessen wurden, dargestellt.

Probanden Nr.	Geschlecht	nach Gl. 3.4-9 errechneter dezipol-Wert						Ranking
		15	9	7	5	2	18	
		direkt in der Einheit dezipol bewertete Werte						
1	w	14	9	7	6	11	14	1
2	m	15	11	8	11	7	16	10
3	w	15,5	11,5	3	11	4	16	9
4	m	16	11	8	7	5	15	6
5	w	15	12	16	13	4	17	13
6	w	14	5	3	5,5	2	11	8
7	m	14	5	6	16	10	12	25
8	w	11	13	10	16	6	16	23
9	m	6	9	16	13	7	10	32
10	w	14	6	8	14	4	15	15
11	m	15	9	7	6	3	13	2
12	w	15	5	16	8	3	14	16
13	m	10	4	15	2	3	14	19
14	w	15	10	6	1	5	7	14
15	w	16	9	11	5	12	16	11
16	m	14	10	7	1	6	19	3
17	m	14	10	16	8	16	9	27
18	m	4	16	13	11	7	14	34
19	m	9	16	12	10	6		30
20	m	7	17	15	5	7		28
21	m	10	18	17	8	6		31
22	w	10	17	16	12	3	16	25
23	m	4	16	13	6	10	8	33
24	m	8	17	16	7	5		29
25	w				3	10	16	17
26	m	10	7	6	8	4	13	12
27	m	4,5	11	13	10	4,5	14	18
28	w	8	4	2	2,5	4	7	21
29	m	5	4	9	5	5	10	20
30	m	17	13	6	7	4	16	7
31	w	13,1	9,5	7,5	4,3	3	8	4
32	m	4	3	7	1,5	6	14	22
33	w	15	8	4	3	0,7	11,5	5
34	w	13	9	11	2	15	7	24
arithmetisches Mittel		11,4	10,2	10,0	7,3	6,1	13,0	
Median		13,1	9,5	7,5	6,5	5,0	14,0	

Tabelle 7.1-1: Die bewertete Empfundene Luftqualität bei untrainierten Probanden

Da man die Verteilungsform durch das Vergleichen des arithmetischen Mittels mit dem Median leicht feststellen kann, werden hier beide Werten berechnet. Die Differenz der beiden Größen gibt die Verformung der Verteilung von der symmetrischen Normalverteilung an. Je größer die Differenz ist, desto größer ist die Verformung von der Normalverteilung. Mit dieser Eigenschaft kann man ungefähr den Trend der Verteilung schätzen, d.h. wie schief sich die einzelnen Bewertungen asymmetrisch verteilen.

Die linkssteile Verteilung

Bei relativ niedriger Azetonkonzentration, die nach Gl. 3.4-9 den Betrag zwischen 0 – 6 dezipol erreicht, verteilen sich die angegebenen Empfundenen Luftqualitäten linksteil. Das bedeutet, dass sich die Bewertungen um einen Mittelwert asymmetrisch verteilen.

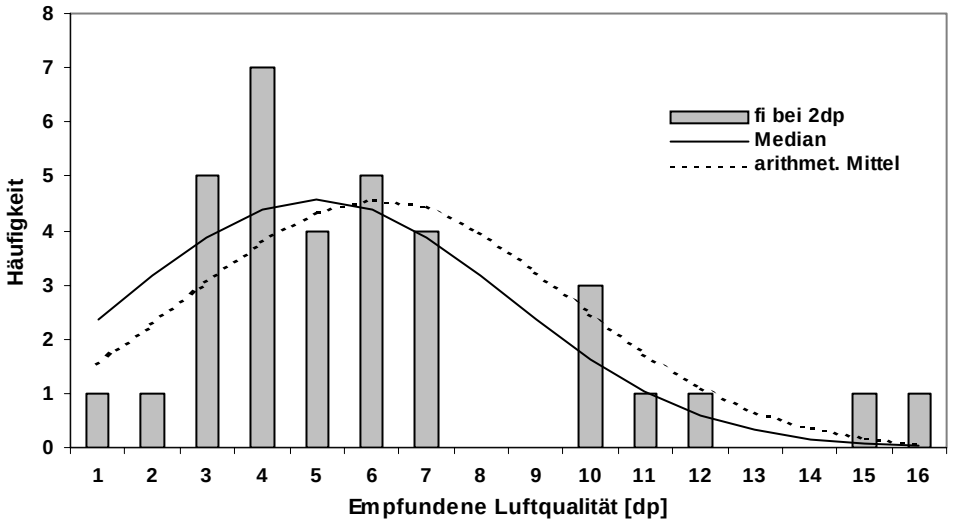

Bild 7.1-1: Die Verteilung der bewerteten Empfundenen Luftqualität bei der errechneten Empfundenen Luftqualität von 2 dezipol

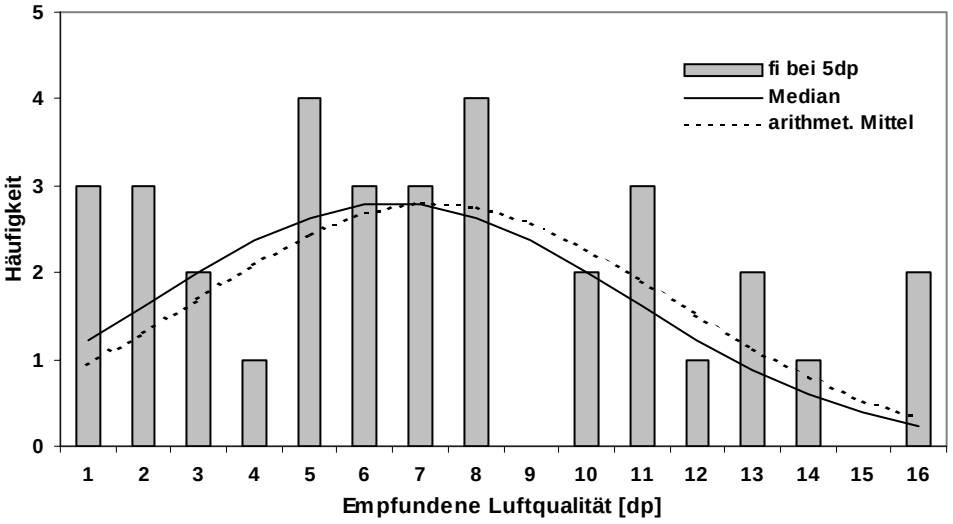

Bild 7.1-2: Die Verteilung der bewerteten Empfundenen Luftqualität bei der errechneten Empfundenen Luftqualität von 5 dezipol

In Bild 7.1-1 und 7.1-2 werden die Häufigkeiten der angegebenen Empfundenen Luftqualitäten und jeweils zwei Normalverteilungen, die wegen der Verformung unterschiedliche Werten für das arithmetische Mittel und den Medianwert haben, dargestellt. Für das Streuungsmaß wird die Standardabweichung, die nach Gl. 3.3-5 ermittelt wird, genommen.

Bei einer gegebenen Azetonkonzentration, die nach Gl. 3.4-9 der Empfundenen Luftqualität von 2 dezipol entspricht, verformt sich die Verteilung der bewerteten Empfundenen Luftqualitäten wegen der nach unten bei 0 dezipol beschränkten Skala. Die Beschränkung der Skala beeinflusst die Verteilungsform und damit auch den Mittelwert. Er wird mehr oder weniger größer als der tatsächliche Wert, da Angaben kleiner als die eingeschränkte Skala nicht erlaubt sind. Eigentlich müssen die beiden Größen, die errechnete Empfundene Luftqualität und die angegebene mittlere Empfundene Luftqualität gleich groß sein, nämlich dann, wenn sich die angegebenen Empfundenen Luftqualitäten im Toleranzbereich auf beiden Seiten gleichmäßig verteilten (siehe Bild 3.4-12). Obwohl die nach Gl. 3.4-9 berechnete Empfundene Luftqualität für den Fall in Bild 7.1-1 den Wert von 2 dezipol besitzt, erreicht die mittlere Empfundene Luftqualität beim Median 4,8 dezipol und beim arithmetischen Mittel sogar 6,1 dezipol. Dieser Trend setzt sich - wie in Bild 7.1-2 gezeigt - zur Mitte hin fort.

Die symmetrische Verteilung

Für Azetonkonzentrationen, die nach Gl. 3.4-9 der Empfundenen Luftqualität von 6 – 11 dezipol entsprechen, verteilen sich die angegebenen Empfundenen Luftqualitäten symmetrisch (siehe Bild 7.1-3 und 7.1-4).

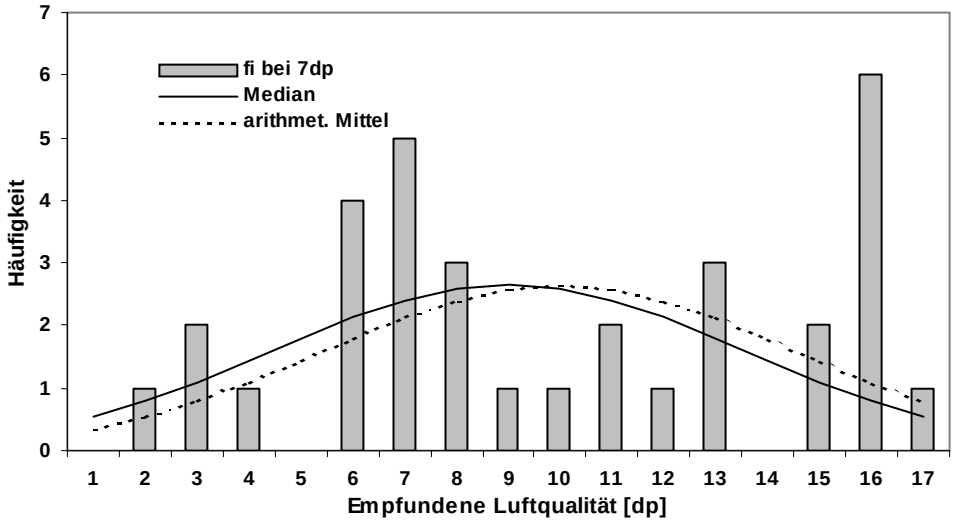

Bild 7.1-3: Die Verteilung der bewerteten Empfundenen Luftqualität bei der errechneten Empfundenen Luftqualität von 7 dezipol

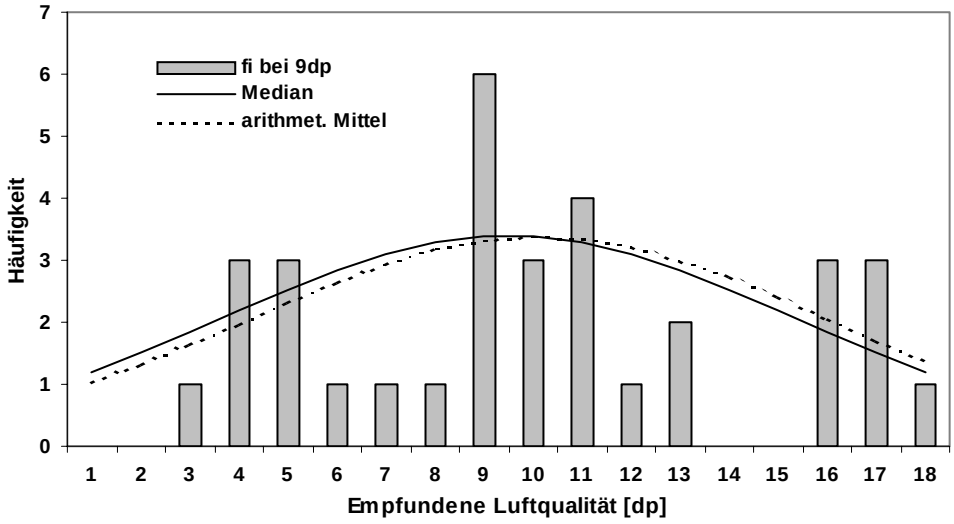

Bild 7.1-4: Die Verteilung der bewerteten Empfundenen Luftqualität bei der errechneten Empfundenen Luftqualität von 9 dezipol

Die rechtssteile Verteilung

Eine relativ starke Azetonkonzentration, die nach Gl. 3.4-9 der Empfundenen Luftqualität von über 15 dezipol entspricht, wird von untrainierten Probanden meist schwächer bewertet als die tatsächlich gegebene Luftqualität (siehe Bild 7.15 und 7.1-6). Dadurch ist die Verteilung links flach und rechts steil.

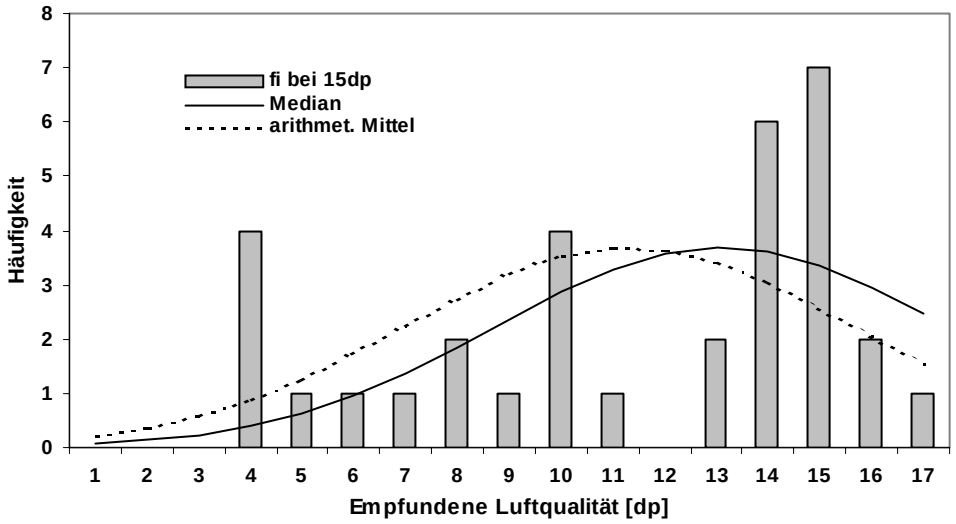

Bild 7.1-5: Die Verteilung der bewerteten Empfundenen Luftqualität bei der errechneten Empfundenen Luftqualität von 15 dezipol

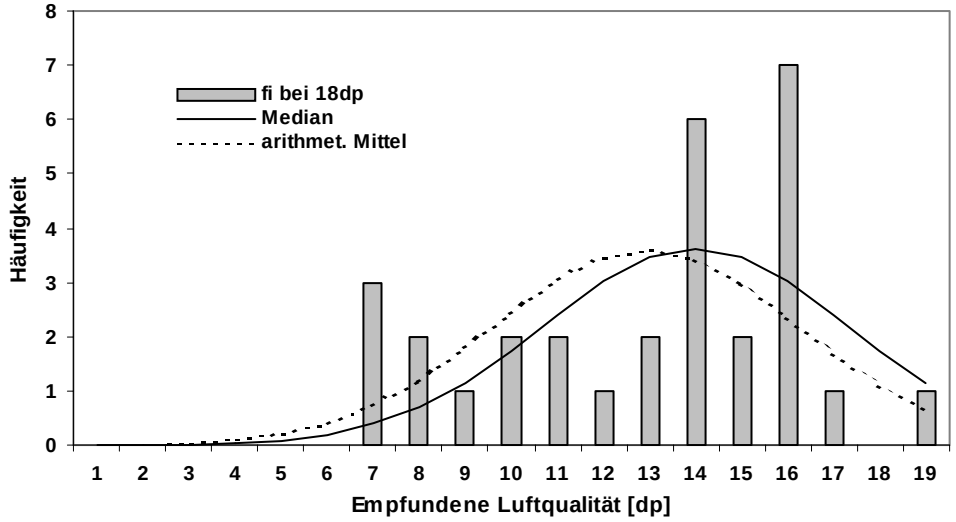

Bild 7.1-6: Die Verteilung der bewerteten Empfundenen Luftqualität bei der errechneten Empfundenen Luftqualität von 18 dezipol

Bei der relativ hohen Empfundenen Luftqualität von über 13 dezipol, die nach Gl. 3.4-9 aus der Azetonkonzentration rechnerisch ermittelt wird, ist die bewertete mittlere Empfundene Luftqualität kleiner als die errechnete Empfundene Luftqualität.

Das arithmetische Mittel und der Median als zentrale Tendenz

Der Median nähert sich im gesamten Konzentrationsbereich besser an die Identitätskurve an als der arithmetische Mittelwert. Das arithmetische Mittel besitzt die Eigenschaft, dass durch die 2. Potenz größere Abweichungen stärker gewichtet werden als kleinere Abweichungen. Ist man also daran interessiert, dass große Schätzfehler möglichst vermieden werden sollen, muss genau ein Wert gefunden werden. Dieser Wert ist das arithmetische Mittel. Dagegen werden die Abweichungen beim Median gleich gewichtet. Der Median hat also die Eigenschaft, dass die Summe der Absolutbeträge der Abweichungen der einzelnen Werte vom Median ein Minimum ergibt. Wird der Median als Schätzung des Wertes einer Person A verwendet, dürfen große Fehler mit gleicher Wahrscheinlichkeit auftreten wie kleine Fehler.

Um stark abweichende Bewertungen nicht so stark in die mittlere Bewertung mit einfließen zu lassen, schlägt daher Böttcher (2003) vor, statt des arithmetischen Mittels den Median als zentrales Maß anzuwenden.

Der neue Zusammenhang zwischen der Azetonkonzentration und der Empfundenen Luftqualität

Die bewertete Empfundene Luftqualität ist bei relativ niedrigen Azetonkonzentrationen größer als die errechnete Empfundene Luftqualität, bei höheren Azetonkonzentrationen hingegen kleiner. Der Zusammenhang zwischen der mittleren bewerteten Empfundenen Luftqualität und der Azetonkonzentration ist in Bild 7.1-7 dargestellt.

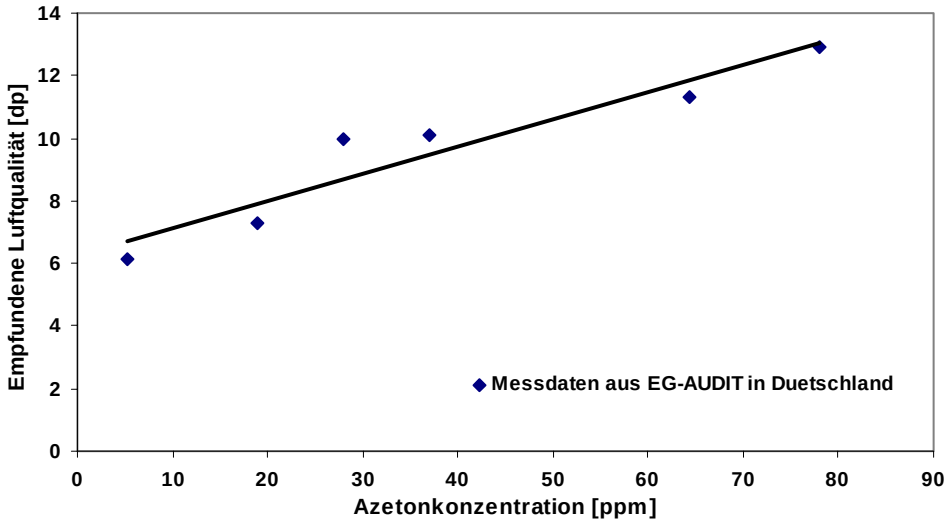

Bild 7.1-7: Der Zusammenhang zwischen der bewerteten mittleren Empfundenen Luftqualität und der Azetonkonzentration bei untrainierten Probanden

Es wurden sehr große Abweichungen zwischen der bewerteten Empfundenen Luftqualitäten nach dem dezipol-Verfahren und der errechneten Empfunden Luftqualitäten nach dem 2-Punkt-Verfahren festgestellt. Obwohl die Probanden während des Versuchsdurchganges die Meilensteine zum Vergleich zur Verfügung hatten.

Mit einer Näherungskurve für die Mittelwerte kann man den neuen Zusammenhang zwischen der Azetonkonzentration und der Empfundenen Luftqualität festlegen. Die Näherungsgleichung lautet:

$$ELQ_{bewertet} = 6{,}27 + 0.1 \cdot c_{Azeton} \qquad \text{(Gl. 7.1-1)}$$

mit c_{Azeton} : Azetonkonzentration in ppm

Aus beiden Gleichungen 3.4-9 und 7.1-1 kann man eine Gleichung, mit Hilfe derer die Empfundene Luftqualität nach dem 2-Punkt-Verfahren in die Empfundene Luftqualität nach dem dezipol-Verfahren umgerechnet werden kann, ermitteln.

$$ELQ_{bewertet} = 5{,}89 + 0{,}45 \cdot ELQ_{errechnet} \qquad \text{(Gl. 7.1-2)}$$

mit $ELQ_{errechnet}$: Empfundene Luftqualität in dezipol, die aus dem Prozentsatz Unzufriedener mit Hilfe von Gleichung 3.4-8 errechnet wird.

$ELQ_{bewertet}$: mittlere Empfundene Luftqualität in dezipol, die nach dem dezipol-Verfarhen direkt in der Einheit dezipol bewertet wird.

Um die Differenz, die durch die Anwendung der verschiedenen Verfahren entsteht, zu veranschaulichen, wird der Zusammenhang zwischen beiden Empfundenen Luftqualitäten in Bild 7.1-8 dargestellt.

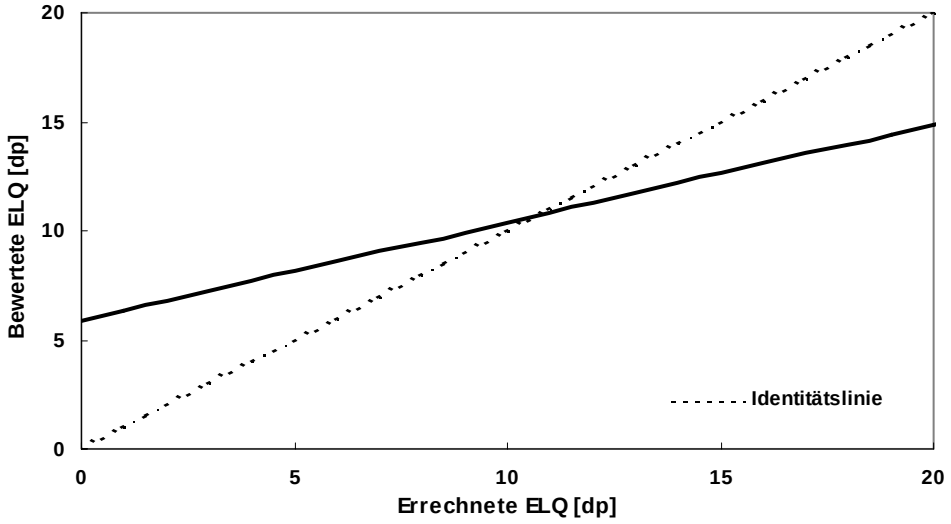

Bild 7.1-8: Zusammenhang zwischen der errechneten Empfundenen Luftqualität und der bewerteten Empfundenen Luftqualität bei untrainierten Probanden

Nach dem 2-Punkt-Verfahren ergibt sich für eine hohe Luftqualität eine Empfundene Luftqualität von 0,7 dezipol (siehe Tab. 2.1-1). Wird die Luftqualität hingegen durch ein untrainiertes Probandenkollektiv nach dem dezipol-Verfahren bestimmt, wird nach Gl. 7.1-2 als hohe Luftqualität 6,2 dezipol gefordert. Der im Vergleich mit der Empfundenen Luftqualität von 0,7 dezipol relativ größere Wert von 6,2 dezipol darf auf keinen Fall so interpretiert werden, dass die Luft eine sehr niedrige Qualität besitzt. Dies beruht allein auf den sich unterscheidenden Bestimmungsverfahren. Wenn man diese Tatsache bei der Berechnung des

Prozentsatzes Unzufriedener aus der Empfundenen Luftqualität nach Gleichung 3.4-3 ignoriert, muss man einen entsprechend großen Fehler in Kauf nehmen.

Möchte man aus der durch ein untrainiertes Probandenkollektiv direkt in der Einheit dezipol bewerteten Empfundenen Luftqualität den Prozentsatz Unzufriedener ermitteln, muss man die bewertete Empfundene Luftqualität mit folgender Gleichung in die errechnete Empfundene Luftqualität umrechnen und in Gleichung 3.4-9 einsetzen:

$$ELQ_{errechnet} = 2{,}22 \cdot ELQ_{bewertet} - 13{,}1 \qquad \text{(Gl. 7.1-3)}$$

mit $ELQ_{errechnet}$: Empfundene Luftqualität in dezipol, die aus dem Prozentsatz Unzufriedener mit Hilfe von Gleichung 3.4-8 errechnet wird.

$ELQ_{bewertet}$: mittlere Empfundene Luftqualität in dezipol, die nach dem dezipol-Verfarhen direkt in der Einheit dezipol bewertet wird.

Der dadurch berechnete neue Zusammenhang zwischen der bewerteten Empfundenen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener ist in Bild 7.1-9 dargestellt.

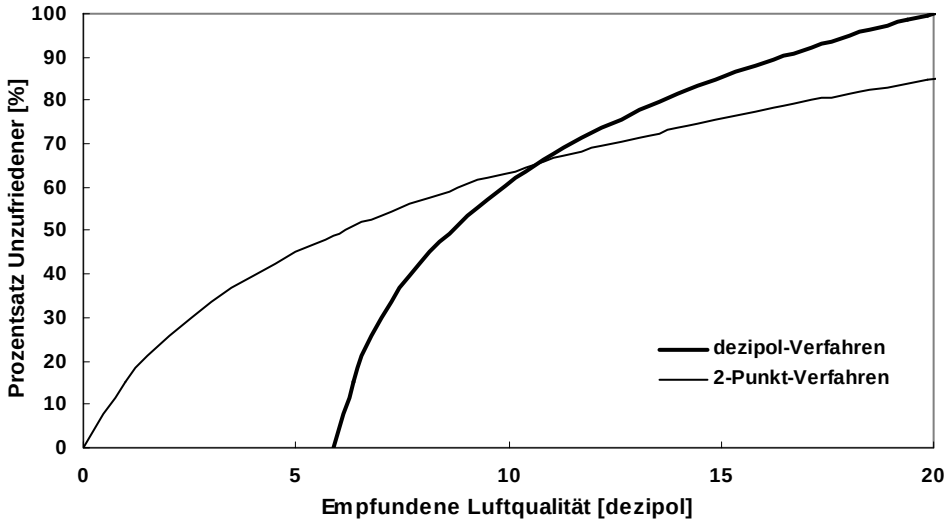

Bild 7.1-9: Der neue Zusammenhang zwischen der Empfundenen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener für untrainierte Probanden

7.1.2 Differenz des Messergebnisses bei trainierten Probanden

Wenn die Azetonkonzentration durch das trainierte Probandenkollektiv nach dem dezipol-Verfahren direkt in der Einheit dezipol bestimmt wird, entsteht eine Differenz zwischen der angegebenen Empfundenen Luftqualität und der errechneten Luftqualität. Der Trend, bei dem die angegebene Empfundene Luftqualität bei niedrigen Azetonkonzentrationen größer als die errechnete Empfundene Luftqualität und bei höheren Azetonkonzentrationen kleiner ist, hält auch hier an. Aber der Betrag der Differenz zwischen beiden Werten wird im Vergleich zum untrainierten Probandenkollektiv deutlich verkleinert.

Nach der Einrichtung der Meilensteine wurden unter der Leitung von Bluyssen (1990) mit Hilfe von 8 verschiedenen Azetonkonzentrationen von einem trainierten Probandenkollektiv direkt die Empfundenen Luftqualitäten bewertet und ein neuer Zusammenhang zwischen der Azetonkonzentration und der angegebenen Empfundenen Luftqualität festgelegt. Der neue Zusammenhang lautete:

$$ELQ_{bewertet} = 3{,}04 + 0{,}15 \cdot c_{Azeton} \qquad \text{(Gl. 7.1-4)}$$

mit c_{Azeton} : Azetonkonzentration in ppm

$ELQ_{bewertet}$: Mittlere Empfundene Luftqualität in dezipol, die nach dem dezipol-Verfarhen direkt in dezipol bewertet wird.

Aus Gleichungen 3.4-9 und 7.1-4 kann man eine neue Gleichung, die die errechnete Empfundene Luftqualität in die bewertete Empfundene Luftqualität für das trainierte Probandenkollektiv umwandelt, ermitteln.

$$ELQ_{bewertet} = 2{,}47 + 0{,}68 \cdot ELQ_{errechnet} \qquad \text{(Gl. 7.1-5)}$$

mit $ELQ_{errechnet}$: Empfundene Luftqualität in dezipol, die aus dem Prozentsatz Unzufriedener mit Hilfe von Gleichung 3.4-8 errechnet wird

$ELQ_{bewertet}$: Mittlere Empfundene Luftqualität in dezipol, die nach dem dezipol-Verfarhen direkt in der Einheit dezipol bewertet wird.

Obwohl die Empfundene Luftqualität für die Azetonkonzentration von 0 ppm nach Gleichung 7.1-4 bereits 3,04 dezipol erreicht, wurde diese trendbedingte Abweichung nicht beachtet. Wenn man die Empfundene Luftqualität für die Azetonkonzentration mit der nach Gleichung 3.4-9 berechneten Empfundenen Luftqualität vergleicht, kann man bei der Azetonkonzentration von 0 ppm eine Differenz um 2,2 dezipol feststellen. Allein durch diese Abweichung wird die Luftqualität schon als sehr schlecht bewertet (siehe Tab. 2.1-1). Da die Empfundene Luftqualität mit dem Prozentsatz Unzufriedener in einem exponentiellen Zusammenhang steht, verursacht diese Abweichung bei niedriger Empfundener Luftqualität eine erhebliche Abweichung des Prozentsatzes Unzufriedener. Schon bei 0 ppm kann eine Abweichung des Prozentsatzes Unzufriedener von 20% eintreten.

Die Differenz zwischen beiden Empfundenen Luftqualitäten wird in Bild 7.1-10 veranschaulicht.

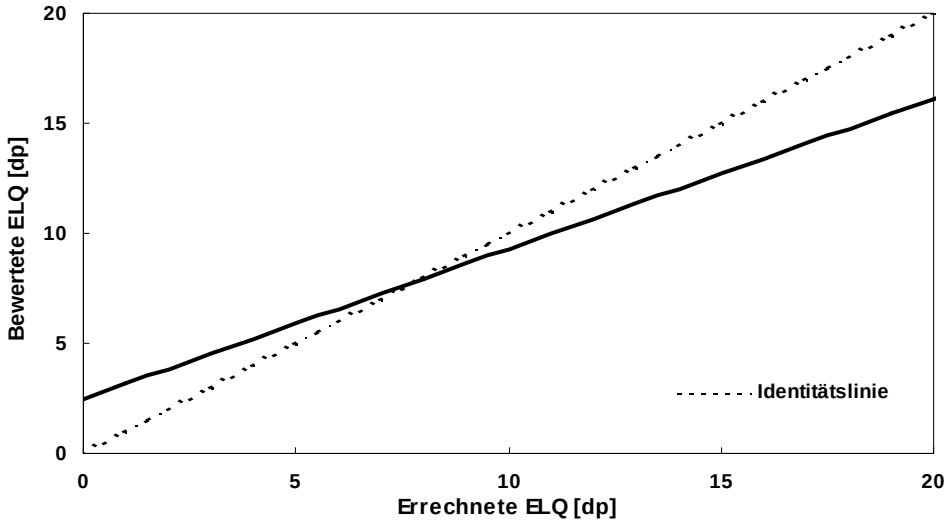

Bild 7.1-10: Zusammenhang zwischen der errechneten Empfundenen Luftqualität und der bewerteten Empfundenen Luftqualität bei trainierten Probanden

Da die Prinzipien der Geruchswahrnehmung bei allen Menschen gleich sind, muss man den Zusammenhang neu definieren, wenn aus der konstanten Azetonkonzentration der Prozentsatz Unzufriedener unabhängig vom Bestimmungsverfahren ermittelt werden soll. Möchte man also aus den direkt

bestimmten Messwerten nach dem dezipol-Verfahren den Prozentsatz Unzufriedener berechnen, muss die bewertete Empfundene Luftqualität mit folgender Gleichung in die errechnete Empfundene Luftqualität umgerechnet und in Gleichung 3.4-3 eingesetzt werden:

$$ELQ_{errechnet} = 1{,}47 \cdot ELQ_{bewertet} - 3{,}63 \qquad \text{(Gl. 7.1-6)}$$

mit $ELQ_{errechnet}$: Empfundene Luftqualität in dezipol, die aus dem Prozentsatz Unzufriedener mit Hilfe von Gleichung 3.4-8 errechnet wird.

$ELQ_{bewertet}$: mittlere Empfundene Luftqualität in dezipol, die nach dem dezipol-Verfarhen direkt in der Einheit dezipol bewertet wird.

Der neue Zusammenhang ist in Bild 7.1-11 dargestellt.

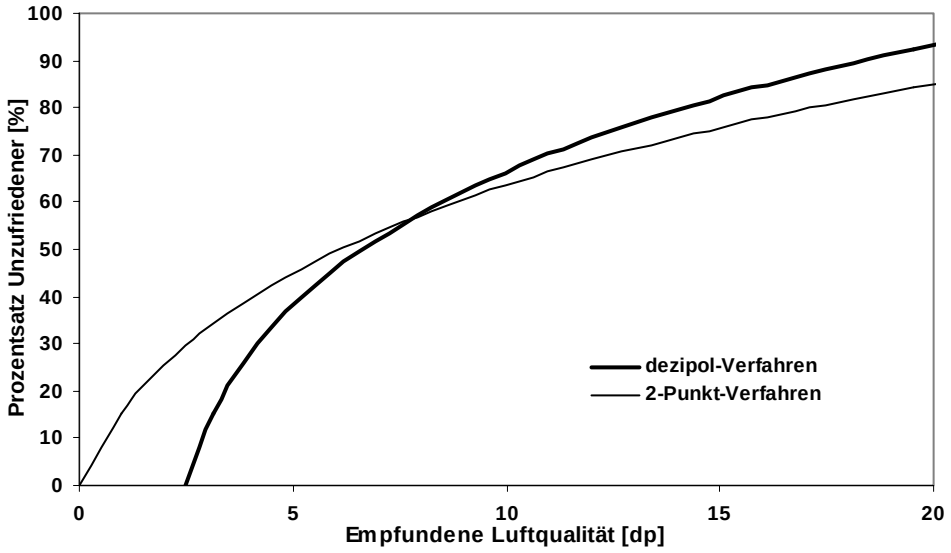

Bild 7.1-11: Zusammenhang zwischen der Empfundenen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener für trainierte Probanden

Wir haben in Kap. 5 den neuen Zusammenhang zwischen der durch das trainierte Probandenkollektiv direkt in dezipol bewerteten Empfundenen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener mit der Summenhäufigkeitsfunktion der Normalverteilung von [N(6,5;2,3)] beschrieben. Zum Vergleichen der neuen Exponentialfunktion mit der S-Funktion werden beide Funktionen zusammen in Bild 7.1-12 dargestellt.

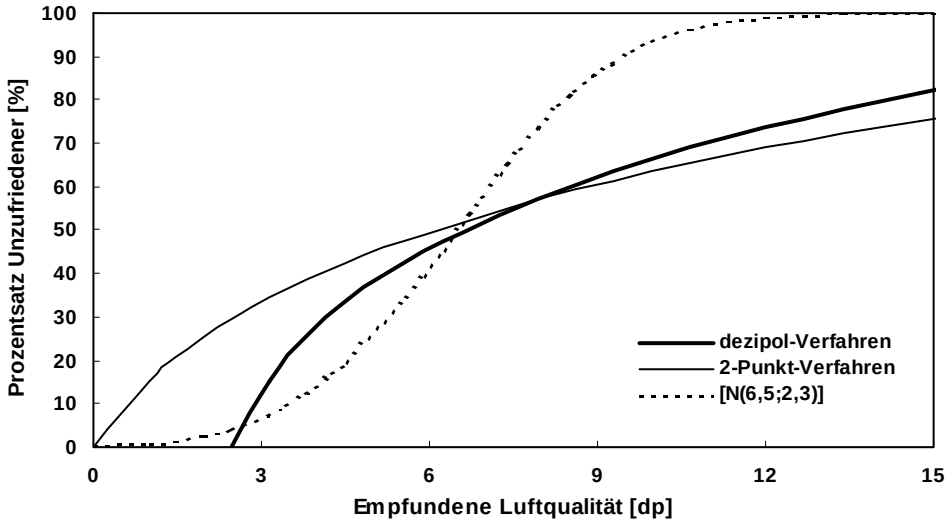

Bild 7.1-12: Die neue Exponentialfunktion und die S-Funktion

Die S-Funktion nähert sich im niedrigen dezipol-Bereich relativ gut an die neue Exponentialfunktion an.

Der Trend der Differenz wurde bei anderen Versuchen zur Bestimmung der Luftqualität von Azetonkonzentration bestätigt. Gleichung 7.1-7 wurde von Spiess (1998) aufgestellt. Gleichung 7.1-8 wurde aus Messdaten von Bitter (2001) ermittelt.

$$ELQ_{bewertet} = 2{,}29 + 0{,}16 \cdot c_{Azeton} \qquad \text{(Gl. 7.1-7)}$$

$$ELQ_{bewertet} = 3{,}79 + 0{,}1 \cdot c_{Azeton} \qquad \text{(Gl. 7.1-8)}$$

Die Bestimmung der Empfundenen Luftqualität erfolgt direkt durch Vergleich mit dem zuvor definierten Maßstab, also mit den Meilensteinen. Dabei bezeichnet man die bewertete Messgröße für die Empfundene Luftqualität als das Vielfache der Einheit in dezipol. In Analogie zur physikalischen Größe wird die Messgröße als unabhängig vom Messverfahren interpretiert, da die Einheit gleich ist. Bei der psychophysiologischen Messung kann eine derart vereinfachte Interpretation einen großen Vorhersagefehler hervorrufen, wenn das psychologische Entscheidungsproblem nicht berücksichtigt wird.

7.2 Vergleich des Umrechnungsmodells von Wargocki mit der S-Funktion

Diese Differenz wurde von Wargocki (1998) bei der Versuchsdurchführung zur Bestimmung der Luftqualität von verschiedenen VOCs (volatile organic compounds) festgestellt. Darunter gehören auch die Azetonkonzentrationen. Als Ursache für die Entstehung der Differenz vermutet er das Training der Probanden mit falsch skalierten Meilensteinen, was durch die Vernachlässigung des Grundpegels an Azetonkonzentration im Prüfungsraum hervorgerufen werden kann. Er stellte zwei Modelle vor, mit denen man einerseits aus der Geruchsstoffkonzentration die Akzeptanz für das untrainierte Probandenkollektiv und andererseits die Empfundene Luftqualität für das trainierte Probandenkollektiv ermitteln kann.

Das Modell für untrainierte Probanden

Die Luftqualität wurde durch ein untrainiertes Probandenkollektiv nach dem 20-Punkt-Verfahren bewertet. Das Modell für die Beziehung zwischen dem Reiz und der Empfindung wurde logarithmisch dargestellt:

$$Ak = k_1 \cdot LOG(C_{VOC}) + k_2 \qquad \text{(Gl. 7.2-1)}$$

mit Ak : mittlere Akzeptanz
k_1, k_2 : konstante Koeffizienten
C_{VOC} : Geruchsträgerkonzentration in mg/m^3

Zur Ermittlung der Empfundenen Luftqualität für das untrainierte Probandenkollektiv wurde die Akzeptanz in folgende Gleichung, die aus Gleichungen von 3.4-7 und 3.4-8 ermittelt wird, eingesetzt.

$$ELQ_{untr.} = 112 \cdot \left[5{,}98 - LN\left(\frac{EXP(-0{,}18 - 5{,}28 \cdot Ak)}{1 + EXP(-0{,}18 - 5{,}28 \cdot Ak)} \cdot 100 \right) \right]^{-4}$$

(Gl. 7.2-2)

mit $ELQ_{untr.}$: Empfundene Luftqualität für die untrainierten Probanden in dezipol

Das Modell für trainierte Probanden

Die Empfundene Luftqualität wurde durch ein trainiertes Probandenkollektiv nach dem dezipol-Verfahren direkt in dezipol bewertet. Das Modell für die Beziehung zwischen dem Reiz und der Empfindung wurde mit einer Potenzfunktion dargestellt:

$$ELQ_{tr.} = k_3 \cdot C_{VOC}^{\ k_4} + k_5 \qquad \text{(Gl. 7.2-3)}$$

mit k_3, k_4, k_5: konstante Koeffizienten

C_{VOC} : Geruchsstoffkonzentration in mg/m^3

$ELQ_{tr.}$: Empfundene Luftqualität für trainierte Probanden in dezipol

Das Umrechnungsmodell

Zur Umrechnung der Empfundenen Luftqualität durch das trainierte Probandenkollektiv in die Empfundene Luftqualität für das untrainierte Probandenkollektiv stellte er dann folgendes Umrechnungsmodell fest:

$$ELQ_{untr.} = 112 \cdot \left[5{,}98 - LN \frac{100}{1 + \frac{1}{EXP(-12{,}9 + 11{,}6 \cdot LOG(ELQ_{tr.} + 6{,}6))}} \right]^{-4}$$

(Gl. 7.2-4)

mit $ELQ_{untr.}$: Empfundene Luftqualität für die untrainierten Probanden in dezipol

$ELQ_{tr.}$: Empfundene Luftqualität für die trainierten Probanden in dezipol

Diese Gleichung ist nur für Messungen im Prüfraum gültig, da die Messwerte abhängig von Messort, Feld oder Prüfraum, unterschiedlich groß sind. Wargocki verglich dabei die Empfundene Luftqualität für das trainierte Probandenkollektiv mit der Empfundenen Luftqualität für das untrainierte Probandenkollektiv. Der Zusammenhang zwischen beiden Empfundenen Luftqualitäten ist in Bild 7.2-1 dargestellt.

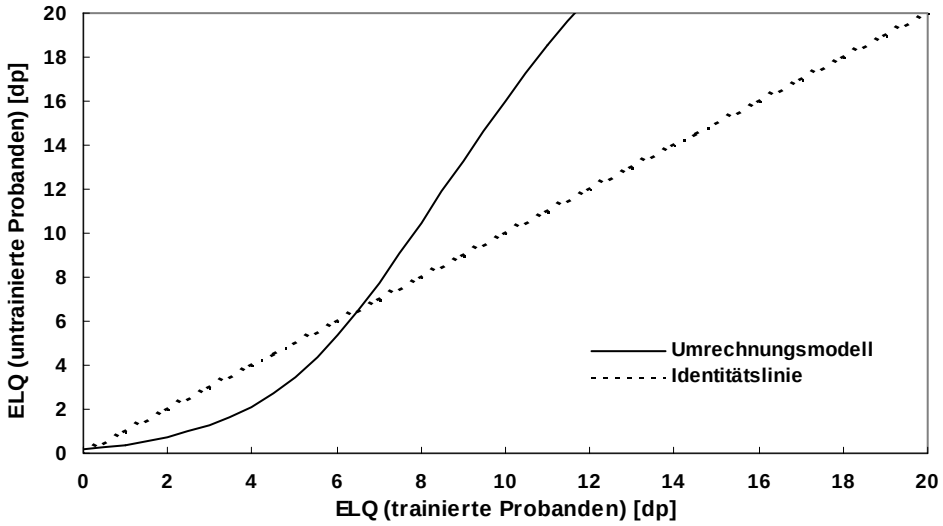

Bild 7.2-1: Zusammenhang zwischen der durch das trainierte Probandenkollektiv und der durch das untrainierte Probandenkollektiv bestimmten Empfundenen Luftqualität nach Wargocki (1998)

Wie schon in Kap. 5 erwähnt, kann man den Prozentsatz Unzufriedener aus der bewerteten Empfundenen Luftqualität mit Hilfe der Summenhäufigkeitsfunktion ermitteln. Vergleichen wir nun das Umrechnungsmodell von Wargocki mit der Summenhäufigkeitsfunktion für das trainierte Probandenkollektiv [N(6,5;2,3)]. Der Prozentsatz Unzufriedener kann aus der bewerteten Empfundenen Luftqualität mit Hilfe von Gleichung 5.2-4 berechnet werden. Nach Gleichung 3.4-8 kann man aus dem Prozentsatz Unzufriedener indirekt die errechnete Empfundene Luftqualität, die für das 2-Punkt-Verfahren gültig ist, ermitteln. Beide Kurven sind in Bild 7.2-2 zusammen dargestellt.

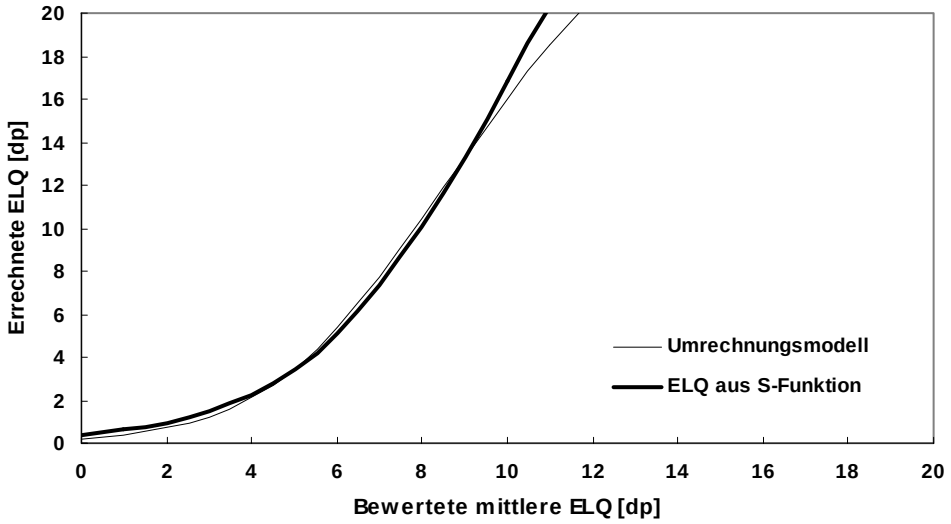

Bild 7.2-2: Vergleich des Zusammenhangs zwischen der bewerteten und der errechneten Empfundenen Luftqualität

Die bewertete Empfundene Luftqualität in Bild 7.2-2 entspricht der Empfundenen Luftqualität für trainierte Probanden nach Wargocki. Die Empfundene Luftqualität für das trainierte Probandenkollektiv kann man mit der errechneten Empfundenen Luftqualität vergleichen. Die beiden Kurven verlaufen im Bereich von 0 bis 10 dezipol fast identisch.

Man kann also den von der Identitätskurve abweichenden Zusammenhang in Bild 7.2-1 durch die Verschiedenheit der Bestimmungsverfahren zur Empfundenen Luftqualität erklären.

8 Erklärung der Ursache der von den angewendeten Verfahren abhängigen Differenz

„Messen“ wird in der Alltagssprache meistens mit physikalischen Vorstellungen in Verbindung gebracht. Die Physik untersucht und interpretiert die Erscheinungen der unbelebten Natur. Sie beschränkt sich dabei auf letztlich *beobachtbar*e und *reproduzierbar*e Vorgänge und erfasst diese mit einer Reihe von Begriffen. Die Physik formuliert Gesetze mit Hilfe dieser Begriffe und deren mathematischer Verknüpfungen. Erst das kontrollierte physikalische Experiment beweist, ob das Gesetz korrekt erkannt und formuliert ist. Das gefundene und bestätigte Gesetz erlaubt dann, physikalische Vorgänge quantitativ vorauszusagen.

Messen einer physikalischen Größe erfolgt direkt durch Vergleich mit einem zuvor definierten Maßstab. Dabei bezeichnet man als fundamentale Messungen das Bestimmen einer Maßzahl als das Vielfache einer Einheit. Bei der Messung der physikalischen Größen müssen die subjektiven Einflüsse des Prüfers auf das Messergebnis streng ausgeschlossen werden. Die Messung der physikalischen Größe ist eindeutig festgestellt, so dass unabhängig von Prüfer möglichst ein gleiches Ergebnis für die gleiche physikalische Erscheinung bei jeder Messung unter den vorgeschriebenen Messbedingungen wiederholt wird. Man braucht dafür ein Messgerät, eine Waage, eine Uhr, ein Thermometer etc. Jedes Messgerät legt bei der Messung eine bestimmte Skala zugrunde, d.h. eine Vorschrift, die bestimmt, auf welche Art einer bestimmten Situation eine Messzahl zuzuordnen ist. Die Einführung einer Maßskala ist somit stets eine Sache der Vereinbarung.

Obwohl jede Messung kontrolliert durchgeführt wird, ist sie trotzdem mit einem möglichst klein zu haltenden Fehler, der unvermeidbar ist, behaftet. Wird dieselbe physikalische Größe sehr oft gemessen, und sind die n Einzelmessungen voneinander unabhängig, d.h. nur die zufälligen Fehler kommen ins Spiel, so kann man einen Mittelwert $\overline{x}$ der Einzelmessungen berechnen. Trägt man auf, wie häufig die Einzelmessungen derselben physikalischen Größen denselben Wert liefern (natürlich nur sinnvoll, wenn man die Messung sehr häufig wiederholt), so liegen die Messpunkte sehr oft auf einer symmetrischen und glockenförmigen Kurve, genannt Normal- oder Gaußverteilung. Diese Verteilungskurve wird als eine Fehlerverteilungskurve bezeichnet. Die Größe „Standardabweichung“ gibt dann die Messungenauigkeit von $\overline{x}$ an. Die übliche Darstellung ist:

$$y = \overline{x} \pm \sigma$$

Interpretation: y ist die Wahrscheinlichkeit, bei einer erneuten Messung von x dieselben Messwerte im Intervall $\bar{x} - \sigma \leq \bar{x} \leq \bar{x} + \sigma$ zu finden; sie beträgt 0,683: d.h. von drei Messungen werden zwei im angegebenen Intervall liegen.

In der Psychophysik werden Empfindungen nach der Wirkung auf die menschlichen Organe bewertet. Die Organe reagieren auf die Reize nicht einfach gemäß dem Prinzip von Reiz und Wirkung, sondern nach komplexen Vorgängen. Obwohl bis jetzt sehr umfangreiche Experimenten durchgeführt wurden, ist noch kein einheitlicher Zusammenhang zwischen chemisch-physikalischen Reizen und physio-psychologischen Empfindungen gefunden worden. Es scheint, dass insbesondere eine konstante Quantifizierung des Geruchs wegen der intraindividuellen und interindividuellen psychologischen Gründe unmöglich ist.

Bei 2-Punkt-Verfahren wird ein Zusammenhang zwischen dem Prozentsatz Unzufriedener und dem geruchlichen Reiz ermittelt. Der Prozentsatz Unzufriedener ist nicht nur als eine Funktion der Geruchsintensität, sondern auch als eine Funktion der Geruchsqualität zu verstehen. Inwieweit die Geruchsintensität und inwieweit die Geruchsqualität den Prozentsatz Unzufriedener beeinflussen, ist sehr schwer messbar und festlegbar, da diese beiden Größen interindividuell und intraindividuell unterschiedlich empfunden werden.

Deswegen wird es komplizierter, wenn man den Prozentsatz Unzufriedener unter gleichzeitiger Berücksichtigung dieser beiden Faktoren interpretieren will. Man trifft sofort auf das Problem, wenn man die Definition von „Empfundener Luftqualität“ genau verstehen will. Soll unter der Empfundenen Luftqualität die Geruchsintensität verstanden werden oder der Prozentsatz Unzufriedener? Zur Ermittlung der Empfundenen Luftqualität sollte man besser die beiden Beeinflussungsfaktoren, die Geruchsintensität und die Geruchsqualität, getrennt betrachten. Wegen der Unklarheit und der Schwierigkeit der Interpretation kann man diese Empfindungen schwer bewerten.

8.1 Psychologisches Entscheidungsproblem

Die gesamten Faktoren, die den Geruchseindruck beeinflussen können, zu untersuchen und festzustellen, ist fast unmöglich. Trotzdem sind einige Erscheinungen zu erwähnen, die bei der Ermittlung der psychophysiologischen Gesetzmäßigkeiten im allgemeinen häufig beobachtetet werden:

Die zentrale Tendenz („Unsicher: Dann lieber in die Mitte“)

Dieser Urteilsfehler bezeichnet eine Tendenz, alle Urteilsobjekte im mittleren Bereiche der Urteilsskala einzustufen bzw. extreme Ausprägungen zu vermeiden (Korman, 1971). Mit diesem Fehler ist vor allem zu rechnen, wenn die zu beurteilenden Objekte den Beurteilern nur wenig bekannt sind – eine Untersuchungssituation, die eigentlich generell zu vermeiden ist.

Diese Erscheinung wird bei der Bestimmung der Empfundenen Luftqualität nach dem dezipol-Verfahren beobachtet. Die Konzentrationen in der Nähe der Geruchsschwelle werden für die Empfundene Luftqualität höher als die gegebenen Meilensteine bewertet. Nach der eigenen Versuchsdurchführung mit Azeton interpretierte Böttcher (2003) diese Erscheinung wie folgt: Bereits bei der Geruchsschwellenkonzentration beträgt die Empfundene Luftqualität etwa 5 dezipol. Die Angaben der Geruchsschwelle von Azeton weichen voneinander ab, als Mittelwert kann aber von einer Konzentration von ca. 25 mg/m^3 ausgegangen werden. Bei dieser Konzentration nimmt die Hälfte des Probandenkollektivs den Geruch noch nicht wahr, während die andere Hälfte ihn schon als mehr oder weniger stark empfindet. Diese Konzentration ergibt nach Gleichung 3.4-9 eine Empfundene Luftqualität von 3 dezipol und liegt damit im Bereich des schwächsten Meilensteins. Für diejenigen Personen, die einen Geruch noch nicht wahrnehmen können, da die dargebotene Konzentration unterhalb ihrer Geruchsschwellen-konzentration liegt, bedeutet dies bei methodisch korrektem Vorgehen, dass sie einem Geruch, den sie nicht riechen können, die Empfundene Luftqualität von 3 dezipol zuordnen. Durch die Mittelwertbildung mit den Aussagen der empfindlicheren Personen der Versuchsgruppe würde sich dann zwangsläufig eine Empfundene Luftqualität größer als 3 dezipol ergeben.

Die Tendenz: „Unsicher, dann lieber in die Mitte“, wird auch bei höheren Azetonkonzentrationen beobachtet. Nach dem Weber-Fechner-Gesetz hat die Unterscheidung eine logarithmische Funktion. Danach kann man z.B. die Masse von 1kg von der Masse 2kg ohne Schwierigkeit unterscheiden. Dagegen ist es

nicht so einfach, die Masse von 51kg von 50kg voneinander zu unterscheiden. In Analogie zur Masse besteht das Problem bei der Bestimmung der Geruchsreize. Man kann den Geruchsreiz, der z.B. durch eine Konzentration von 10 ppm verursacht wird, von dem Geruchsreiz durch die Konzentration von 15 ppm relativ leicht unterscheiden. Im höheren Konzentrationsbereich, z.B. bei 95 ppm und 100 ppm, ist das dagegen sehr schwer.

Je höher die voneinander zu unterscheidenden Konzentrationen sind, desto größer muss die Differenz von beiden sein. Sonst kann man den Unterschied zwischen Reizen schwer oder gar nicht bemerken. Wenn die Konzentration im gesamten Konzentrationsbereich linear skaliert wird, wird das Problem der Unsicherheit bei höheren Konzentration auftreten. Nach dem psychologischen Entscheidungsproblem können die Probanden in diesem Fall die Empfundene Luftqualität niedriger als die vergleichbaren Meilensteine bewerten.

Der Ceiling-Effekt oder der Decken-Effekt

Dies sind Effekte, die das „Zusammendrängen“ vieler Objekte mit starker, aber unterschiedlicher Merkmalsausprägung in der obersten Kategorie – der „Decke“ – oder mit schwacher, aber unterschiedlicher Merkmalsausprägung in der untersten Kategorie – dem „Boden“ – bezeichnen. Für ein einheitliches Verständnis des Ursprungs einer Skala ist es hilfreich, wenn der Untersuchungsteilnehmer vor der eigentlichen Beurteilung sämtliche Untersuchungsobjekte (oder doch zumindest Objekte mit extremen Merkmalsausprägungen) kennenlernt. Nur so wird verhindert, dass Objekte mit extremen Merkmalsausprägungen nicht mehr korrekt eingestuft werden können, weil die Extremwerte zuvor bereits für Objekte mit weniger starken Merkmalsausprägungen vergeben wurden. Durch diese Vorgehen werden „ceiling“- oder „floor“-Effekte vermieden. Die Beurteiler können sich so von dem gesamten, realisierten Merkmalskontinuum einen Eindruck verschaffen und dieses, eventuell unterstützt durch verbale Marken, in gleichgroße Intervalle aufteilen. Schwierigkeiten bereiten zudem Skalen, die an beiden Enden begrenzt sind. Untersuchungsteilnehmer, deren Merkmalsaussagen den Endpunkten der Skala entsprechen, können sich dann nur zur Mitte der Skala hin verändern (Borth, 1984). Dies Problem kann wegen der beschränkt skalierten Meilensteine nach unten und nach oben nicht vermieden werden.

8.2 Der Trainingseffekt

Die Verkleinerung der Standardabweichung

Bei der Bestimmung der Luftqualität von Azetonkonzentration nach dem dezipol-Verfahren wurde eine Differenz der bewerteten Empfundenen Luftqualität von der nach Gl. 3.4-9 errechneten Empfundenen Luftqualität nicht nur bei trainierten Probanden sondern auch bei untrainierten festgestellt. Bei untrainierten Probanden war die Differenz im niedrigeren und höheren Konzentrationsbereich noch größer als bei trainierten Probanden. Die Vermutung, dass nur das Training die Ursache für die Differenz ist, ist dadurch falsifiziert. Der entscheidende Unterschied zwischen beiden Gruppen besteht eher in der unterschiedlichen Standardabweichung. Wenn wir annehmen, dass die Prinzipien der Geruchstoffwahrnehmung bei allen Menschen gleich sind, müssen die Personen die Luft nach gleichen Kriterien bewerten. Die Fragestellung gibt den Probanden bei Messungen von psychophysiologischen Zusammenhänge Kriterien. Die Art der Befragung kann einen unterschiedlichen Einfluss auf die Bewertungen der Empfundenen Luftqualität haben. Man kann daher behaupten, dass die verschiedenen Verfahren die Erklärung der Differenz sind.

Trotzdem muss man hier den Trainingseffekt erwähnen, da die Standardabweichung eines Probandenkollektives durch das Training erheblich verkleinert werden kann: Die Standardabweichung der Azetonkonzentration beträgt für das untrainierte Probandenkollektiv 4 dezipol und für das trainierte Probandenkollektiv dagegen 1,8 dezipol. Die Standardabweichung muss bei der Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der Empfundenen Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener berücksichtigt werden.

Obwohl die Differenz zwischen der errechneten und der bewerteten Empfundenen Luftqualität durch das Training verkleinert werden kann, kann man trotzdem die zentrale Tendenz nicht vermeiden. Die Differenz zwischen beiden Werten beträgt bei der Azetonkonzentration von 5 ppm für das trainierte Probandenkollektiv um 1,86 dezipol. Dieser Betrag entsteht durch die unterschiedliche Fragestellung und die Skalierungstechnik. Man kann deswegen diese Differenz allein durch den Trainingseffekt nicht erklären, da sie durch die verschiedenen Systeme der angewendeten Verfahren zur Bestimmung der Empfundenen Luftqualität verursacht wird. Ohne Analyse der unterschiedlichen Verfahren kann die Differenz nicht erklärt werden. Die Differenz ist also systemabhängig. Daher kann man diese Differenz als die systembezogene Abweichung betrachten.

Verminderung des psychologischen Entscheidungsfehlers

Die Azetonkonzentration von 5 ppm soll nach dem dezipol-Verfahren bestimmt werden. Die nach Gl. 3.4-9 errechnete Empfundene Luftqualität beträgt dann 1,94 dezipol. Dagegen erreichte die angegebene mittlere Empfundene Luftqualität durch das trainierte Probandenkollektiv nach Gl. 7.1-4 3,8 dezipol und durch das untrainierten Probandenkollektiv nach Gl. 7.1-1 sogar 6,8 dezipol, obwohl die Meilensteine für die beiden Gruppen bei der Bestimmung der Empfundenen Luftqualität als Maßstab zur Verfügung standen. Die Differenz zwischen der errechneten und der angegebenen Empfundenen Luftqualität ist beim trainierten Probandenkollektiv um 3 dezipol kleiner als beim untrainierten Probandenkollektiv. Der Grund kann darin liegen, dass die trainierten Probanden im Vergleich zu untrainierten Probanden die Intensitäten von Azetonkonzentrationen schärfer voneinander unterscheiden können. D.h. deren Unterscheidungsschwelle ist kleiner. Dadurch wird die Unsicherheit bei der psychologischen Entscheidung vermindert und die Bewertung nähert sich den Meilensteinen an.

Die statistische Bedeutung des Trainings

Alle potentiell untersuchbaren Einheiten, die ein gemeinsames Merkmal aufweisen, werden als Grundgesamtheit bezeichnet. So spricht man beispielsweise von der Grundgesamtheit der Bewohner einer bestimmten Stadt, der Leser einer bestimmten Zeitung usw.. Grundgesamtheiten können ferner einen begrenzten oder einen theoretisch unbegrenzten Umfang aufweisen. Bei olfaktometrischen Messungen nach VDI (1986) stellen die Probanden, ihr Alter sollte zwischen 18 und 50 Jahren liegen, die Grundgesamtheit dar. Ältere Probanden sind erfahrungsgemäß olfaktorisch unempfindlicher als jüngere.

Aus einer Grundgesamtheit wird eine Stichprobe, die in dieser Arbeit als Probandenkollektiv verstanden werden kann, gezogen. Eine Stichprobe stellt also eine Teilmenge aller Grundgesamtheiten dar, die die untersuchungsrelevanten Eigenschaften der Grundgesamtheit möglichst genau abbilden soll. Eine Stichprobe ist somit ein „Miniaturbild“ der Grundgesamtheit. Je besser die Stichprobe die Grundgesamtheit repräsentiert, um so präziser sind die inferenzstatistischen Aussagen über die Grundgesamtheit. Eine zufällige Auswahl von Untersuchungseinheiten aus einer Grundgesamtheit wird als eine Zufallsstichprobe bezeichnet. Weiß man hingegen bereits, welche Determinanten für das zu untersuchenden Merkmal wichtig sind, empfiehlt sich eine geschichtete Stichprobe.

Im Allgemeinen ist die Präzision der Aussage ferner von der Anzahl der untersuchten Probanden und von der Größe der Grundgesamtheit abhängig. Wir können daher der Frage nachgehen, wie groß die Anzahl der Probanden sein muss, um Generalisierungen mit einer bestimmten Mindestgenauigkeit vornehmen zu können. Mit anderen Worten: Wie gut kann auf Grund der Untersuchung einer relativ kleinen Anzahl der Einheiten einer Grundgesamtheit auf die Verteilung der Merkmale aller Einheiten in der Grundgesamtheit geschlossen werden?

Die Größe des Probandenkollektives ist in Praxis wegen der Kosten, der Zeit und aus organisatorischen Gründen zu beschränken. Ein kleiner Umfang der Versuchspersonengruppe ist vorteilhaft und erwünscht. Theoretisch kann die Empfundene Luftqualität durch einen einzigen Probanden bestimmt werden, wenn er die zu bewertende Geruchsstoffkonzentration mit einer konstanten Empfundenen Luftqualität, die für das Grundgesamtheit repräsentativ ist, immer wiederholt bestimmen kann. Aber das ist nur ein wünschenswertes Ideal, weil sich allein zwischen zwei olfaktorischen Messungen für einen Probanden in der Regel Unterschiede bis zu einem Faktor 2 der Geruchsstoffkonzentration ergeben (Neuner-Jehle und Ethweiler, 1991). Aus den Prinzipien der Psychophysik ergibt sich daher, dass eine Geruchsempfindung keine exakte, rein substanzabhängige Konstante ist, sondern als ein arithmetisches Mittel aus einer Vielzahl von Messungen an einer Gruppe von Individuen abgeleitet wird. Untersuchungen zur Empfundenen Luftqualität können entweder mit einer Versuchsgruppe von trainierten (10 bis 14 Personen) oder untrainierten Personen (mehr als 40 Personen) durchgeführt werden (Bluyssen, 1993; Finke, 1996).

In Kap.5 wurden die unterschiedlichen Standardabweichungen beim Vergleich des Messergebnisses des trainierten mit dem des untrainierten Probandenkollektivs festgestellt. Unter der Annahme, dass der Mittelwert der bewerteten Empfundenen Luftqualität bei einer Geruchsstoffkonzentration unabhängig vom Trainingseffekt gleich groß ist, kann man die Gruppen mit den unterschiedlichen Standardabweichungen charakterisieren. Als Folge der Fähigkeit zur feinen Differenzierung bei trainierten Probanden tritt die Verkleinerung der Standardabweichung auf, da die einzelnen Bewertungen der Empfundenen Luftqualität im Vergleich zu der von untrainierten Probanden näher um den Maßstab der Meilensteine streuen. Unter dem trainierten Probandenkollektiv kann man sie als geschichtete Stichproben für die olfaktorische Bestimmung von Azetonkonzentrationen verstehen. Dagegen kann das untrainierte Probandenkollektiv als die Zufallsstichprobe bezeichnet werden. Mit der

geschichteten Stichprobe, d.h. mit den trainierten Probanden, wird die Reproduzierbarkeit des Mittelwertes, der gleich dem zu vergleichenden Meilenstein sein muss, erhöht. Generell gilt, dass eine sinnvoll, d.h. nach relevanten Merkmalen geschichtete Stichprobe zu besseren Schätzwerten der Populationsparameter führt als eine einfache Zufallsstichprobe (Borth, 1985).

Durch das Training wird also gewährleistet, dass die reproduzierbare Aussage über die Empfundene Luftqualität von Azetonkonzentrationen mit der kleineren Anzahl der Versuchspersonen statistisch gesichert wird.

9 Zusammenfassung

Für die Ermittlung der Luftqualität in Innenräumen haben sich in der letzten Zeit drei Verfahren durchgesetzt, um mit Hilfe von Probanden die sogenannte „Empfundene Luftqualität“ zu ermitteln. Zwei Verfahren setzen untrainierte Probanden ein und fragen nach der Akzeptanz der Luft. Das eine verlangt eine Ja-Nein-Antwort (Zweipunktverfahren) und das andere eine Antwort auf einer stetigen Skala von –10 bis +10 (Zwanzigpunktverfahren). Das dritte Verfahren arbeitet mit trainierten Probanden, die die Intensität der Luftverunreinigung im Vergleich mit Azetonquellen verschiedener Konzentration bestimmen.

Es wäre wünschenswert, die Ergebnisse eines Verfahrens in die der anderen umrechnen zu können. Es werden häufig Ergebnisse, die mit dem stetigen Maßstab ermittelt wurden, in Ergebnisse, die mit der Ja-Nein-Frage ermittelt wurden, umgerechnet, um sie miteinander vergleichen zu können.

Bei den Umrechnungsversuchen traten in der Vergangenheit verschiedene Diskrepanzen auf. Die Frage war, ob man die gefundenen Abweichungen erklären kann und ob sie auf physiologische, psychische oder statistische Ursachen zurückzuführen sind. Es sollte auch geklärt werden, ob sich allgemeingültige Umrechnungsregeln ableiten lassen. Eine weitere Frage war bisher ungeklärt: Wenn die mit Azetonkonzentrationen trainierten Probanden die Luftverunreinigung durch Azeton bestimmten, lagen ihre Aussagen bei kleinen Konzentrationen über der Kalibrierkurve des Trainings und bei hohen Konzentrationen darunter.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Statistik. Es werden Rechenansätze bzw. Modelle für die Messverfahren formuliert und an Messergebnissen aus früheren Arbeiten - überwiegend aus dem Hermann-Rietschel-Institut und aus der Literatur - erprobt.

Nach der Beschreibung der physiologischen und psychologischen Grundlagen der Geruchswahrnehmung werden die erforderlichen statistischen Grundlagen der Messverfahren und die Messverfahren selbst beschrieben.

Die Aussagen einer Probandengruppe lassen sich durch eine Normalverteilung annähern. Das gilt sowohl für die Aussage des einzelnen Probanden wie auch für die Gruppe in Bezug auf eine Probe. Es zeigte sich, dass das Zweipunktverfahren eine normalverteilte Häufigkeitskurve und das Zwanzigpunktverfahren die Integration dieser Häufigkeitskurve liefern. Man könnte die Ergebnisse daher leicht

umrechnen, wenn der Mittelwert und die Standardabweichung eines Messergebnisses bekannt wären. Die Standardabweichung wurde bei den bisher durchgeführten Untersuchungen aber nicht mitgemessen, oder zumindest in den Ergebnissen nicht mitgeteilt. Wenn die Standardabweichung bei den Messverfahren und verschiedenen Stoffen gleich wäre, ließe sich eine universelle Umrechnungsformel angeben. Die Standardabweichungen der Aussagen der trainierten und der untrainierten Probanden sind aber bei der gleichen Probe unterschiedlich, und sie sind auch unterschiedlich bei verschiedenen Stoffen.

Die Frage, warum trainierte Probanden bei hohen und niedrigen Konzentrationen andere Werte als die der Trainingskurve ermittelten, konnte durch die endlichen Skalen der Probandenbefragung erklärt werden. Der Fehler wird geringer, wenn statt des Mittelwertes der Aussagen der Median verwendet wird.

Durch die Aufstellung eines statistisch-mathematischen Modells wurden diese Probleme jetzt gelöst und die unterschiedlichen Angaben zur Empfundenen Luftqualität vergleichbar gemacht.

Die statistische Betrachtung und Analyse der drei häufigsten zur Zeit verwendeten Verfahren zur Bestimmung der Empfundenen Luftqualität zeigt Zusammenhänge auf, die es erlauben, die Unterschiede in den Ergebnissen zu erklären und die Ergebnisse von einem zum anderen Verfahren umzurechnen. Dabei wird vorausgesetzt, dass nicht nur die Mittelwerte der Ergebnisse, sondern die Häufigkeitsverteilungen der Messwerte bekannt sind. Das wird zur Zeit bei den bekannten laufenden Forschungen nicht berücksichtigt. Hier sind jetzt Verbesserungen möglich. Viele Diskrepanzen in der Interpretation früherer Messergebnisse lassen sich jetzt erklären und die Beurteilung der Ergebnisse früherer Forschungen ist möglich.

Literaturverzeichnis

[1] Berglund, B., Berglund, V., Ekman, G., Engen, T. (1971):
Individual psychophysical functions for twenty-eight odorants;
In „Geschmack und Geruch; Gustatorische, olfaktorische und trigeminale Wahrnehmung“ (K. J. Burdach, ed.)
Verlag Hans Huber, Bern Stuttgart Toronto, 1. Auflage, 1988.

[2] Bitter, F. (2001):
LOW-OLF-Klimaanlage;
Abschlussbericht über das Forschungsvorhaben S474;
Hermann-Rietschel-Institut für Heizungs- und Klimatechnik, TU-Berlin;
Projektleiter; Fitzner, K.; Berlin.

[3] Bluyssen, P. M. (1990):
Air quality evaluated by a trained panel;
Ph.D. Thesis (1990), Laboratory for Heating and Air Conditioning,
Technical University of Denmark.

[4] Bluyssen, P. M. (1993):
Do filters pollute or clean the air?, Air Infiltration Review, Vol. 14, No.2:
In “Entwicklung eines Gerätes zur Entnahme und Darbietung von Luftproben zur Bestimmung der empfundenen Luftqualität” (B. Müller, 2002)
Dissertation 2002; Technischen Universität Berlin;
VDI Verlag GmbH, Fortschritt-Berichte VDI,
Umwelttechnik Reihe 15, Nr. 242, Düsseldorf 2002.

[5] Borth, J. (1984):
Lehrbuch der empirischen Forschung für Sozialwissenschaftler;
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo, 1985.

[6] Borth, J. (1985):
Lehrbuch der Statistik für Sozialwissenschaftler;
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo
2. Auflage, 1985.

[7] Böttcher, O. (2003):
Experimentelle Untersuchungen zur Berechnung der Empfundenen Luftqualität;
Dissertation 2003, Technischen Universität Berlin;
VDI Verlag GmbH, Fortschritt-Berichte VDI,
Umwelttechnik Reihe 15, Nr. 243, Düsseldorf 2003.

[8] Burdach, Konrad J. (1988):
Geschmack und Geruch (gustatorische, olfaktorische und trigeminale Wahrnehmung);
1. Auflage, Verlag Hans Huber, Bern, Stuttgart, Toronto; 1988.

[9] Clausen, G.; Pejtersen, J.; Bluyssen, P. M. (1993):
Research Manual of European Audit Project to Optimize Indoor Air Quality and Energy Consumption in Office Buildings.
Lyngby and Delft, November 1993, unveröffentlicht

[10] Douek, E. (1974):
The Sense of Smell and its Abnormalitities ;
In „Geschmack und Geruch; Gustatorische, olfaktorische und trigeminale Wahrnehmung“ (K. J. Burdach, ed.)
Verlag Hans Huber, Bern Stuttgart Toronto, 1. Auflage, 1988.

[11] Engen, T., Kilduff, R. A. & Rummo, N. J. (1975):
The influence of alcohol on odor detection;
In „Geschmack und Geruch; Gustatorische, olfaktorische und trigeminale Wahrnehmung“ (K. J. Burdach, ed.)
Verlag Hans Huber, Bern Stuttgart Toronto, 1. Auflage, 1988.

[12] Fang, L. (1997):
Impact of Temperature and Humidity on Perceived Indoor Air Quality;
Ph.D. Thesis, ET-Ph.D. 98-03 ;
Centre for Indoor Environment and Energy Department of Energy Engineering,
Technical University of Denmark, 1997.

[13] Fanger, P. O. (1988):
Introduction of the Olf and Decipol Units to Quantify Air Pollution Perceived by Humans Indoors and Outdoors.
Energy and Buildings, 12 (1998), pp. 1 - 6

[14] Fechner, G. T. (1860):
Elemente der Psychophysik;
In „Experimentelle Untersuchung zur Berechnung der Empfundenen Luftqualität“ (O. Böttcher, 2003),
Dissertation 2003, Technischen Universität Berlin;
VDI Verlag GmbH, Fortschritt-Berichte VDI,
Umwelttechnik Reihe 15, Nr. 243, Düsseldorf 2003.

[15] Finke, U. & Fitzner, K. (1994):
EUROPEAN AUDIT PROJEKT TO OPTIMIZE INDOOR AIR QUALITY AND ENERGY CONSUMPTION IN OFFICE BUILDINGS
Research funded by THE GERMAN ASSOCIATION OF HEATING-, VENTILATION-, SANITARY ENGINEERING (BHKS)
National Report, 1994.

[16] Finke, U. (1996):
Ein Beitrag zu Fragen der Empfundenen Luftqualität in Gebäuden;
Dissertation 1996, Technischen Universität Berlin.

[17] Fischer, J.; Englert N.; Seifert, B. (1998):
Luftverunreinigungen und geruchliche Wahrnehmungen unter besonderer Berücksichtigung von Innenräumen;
Umweltbundesamt, Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene; Berlin, 1998.

[18] Fitzner, K. (2000):
Stand der Entwicklung bei der olfaktorischen Bestimmung der Luftqualität in Innenräumen;
DKV Jahrestagung.

[19] Fruhstorfer, H. (1994):
Chemische Sinne.
In “Luftverunreinigungen und geruchliche Wahrnehmungen unter besonderer Berücksichtigung von Innenräumen” (J. Fischer, N. Englert und B. Seifert, ed.),
Umweltbundesamt, Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene, 1988.

[20] Gunnarsen, L.; Fanger, P.O. (1988):
Adaptation to Indoor air pollution; Healthy Buildings´88, Stockholm, 1988, Vol.3.

[21] Gunnarsen, L.; Fanger, P.O. (1989):
The Influence of Adaptation on Acceptability of Indoor pollution; CLIMA 2000, Sarajevo, 1989.

[22] Gunnarsen, L.; Fanger, P.O. (1992):
Adaptation to Indoor air pollution; Energy and Buildings, 18, 43-54;
aus Wargocki, P. (1998):
Human Perception, Productivity and Symptoms Related to Indoor Air Quality;
Ph.D. Thesis, ET-Ph.D. 98-03 ;
Centre for Indoor Environment and Energy Department of Energy Engineering,
Technical University of Denmark, August 1998.

[23] Handwerker, H. O. (1993):
Allgemeine Sinnesphysiologie
in „Neuro- und Sinnesphysiology“ (R. F. Schmidt, ed.);
Springer Verlag, Berlin.

[24] Korman, A. K. (1971):
Industrial organizational psychologie.
In “Lehrbuch der empirischen Forschung für Sozialwissenschaftler (J. Borth, ed.)“
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo, 1984.

[25] Köster, E. P. (1975):
Human psychophysics in olfaction.
In “Luftverunreinigungen und geruchliche Wahrnehmungen unter besonderer Berücksichtigung von Innenräumen” (J. Fischer, N. Englert und B. Seifert, ed.),
Umweltbundesamt, Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene, 1988.

[26] Laffort, P. & Dravnieks, A. (1973):
An approach to a physical-chemical model of olfactory stimulation in vertebrates by single compounds.
In „Geschmack und Geruch; Gustatorische, olfaktorische und trigeminale Wahrnehmung“ (K. J. Burdach, ed.)
Verlag Hans Huber, Bern Stuttgart Toronto, 1. Auflage, 1988.

[27] LeMagnen, J. (1952):
Les phénomènes olfacto-sexuels chez l'homme;
In „Geschmack und Geruch; Gustatorische, olfaktorische und trigeminale Wahrnehmung“ (K. J. Burdach, ed.)
Verlag Hans Huber, Bern Stuttgart Toronto, 1. Auflage, 1988.

[28] Müller, B. (2002):
Entwicklung eines Gerätes zur Entnahme und Darbietung von Luftproben zur Bestimmung der empfundenen Luftqualität;
Dissertation 2002, Technischen Universität Berlin;
VDI Verlag GmbH, Fortschritt-Berichte VDI,
Umwelttechnik Reihe 15, Nr. 242, Düsseldorf 2002.

[29] Neuner-Jehle, N. und Etzweiler, F. (1991):
The measuring of odors.
In "Luftverunreinigungen und geruchliche Wahrnehmungen unter besonderer Berücksichtigung von Innenräumen" (J. Fischer, N. Englert und B. Seifert, ed.),
Umweltbundesamt, Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene, 1988.

[30] Roth, G. (1998):
Das Gehirn und seine Wirklichkeit, kognitive Neurologie und ihre philosophischen Konsequenzen;
Suhrkamp taschenbuch wissenschaft; 2. Auflage, 1998.

[31] Sachs, L. (1997):
Angewandte Statistik: Anwendung statistischer Methoden;
Springer Verlag Berlin, Heidelberg, Newyork; 1987.

[32] Schiffmann, S. S., Moss, J. & Erickson, R. P. (1976):
Threshold of food odors in the elderly;
In „Geschmack und Geruch; Gustatorische, olfaktorische und trigeminale Wahrnehmung“ (K. J. Burdach, ed.)
Verlag Hans Huber, Bern Stuttgart Toronto, 1. Auflage, 1988.

[33] Schmidt, R. F.; Thews, G.; Lang, F. (2000):
Physiologie des Menschen;
Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York;
28. Auflage, 2000.

[34] Schmidt, R. F. (2001):
Physiologie des Menschen;
Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York;
25. Auflage, 2001.

[35] Schreiber, F. W. (2000):
Perceived Air Quality: Investigation of the Non-Sensory Odor Assesment in Indoor Environments.
A Dissertation Submitted to Faculty III – School of Process Sciences and Engineering – of the Technical University of Berlin
Hermann-Rietschel-Institut für Heizungs- und Klimatechnik, TU-Berlin, 2000.

[36] Schwab, R. (1996):
Fanger contra VDI?
CCI Nr.: 10/1996, 18 – 20.

[37] Spiess, T. (1998):
Steigerung der Luftqualität durch verbesserte Lüftungsgeräte II;
Abschlußbericht über das Forschungsvorhaben 10525/N;
Hermann-Rietschel-Institut für Heizungs- und Klimatechnik, TU-Berlin;
Projektleiter; Fitzner, K.; Berlin, 1998.

[38] Spiess, T. (2001):
Zusammenhang zwischen Prozentsatz Unzufriedener, Akzeptanz und Empfundener Luftqualität bei der Bestimmung der Raumluftqualität durch trainierte und untrainierte Probandengruppen
Hermann-Rietschel-Institut für Heizungs- und Klimatechnik, TU-Berlin, 2001, unveröffentlicht.

[39] Steinheider, B.; Winneke, G.; Schlipköter, H. W. (1993):
Somatische und psychische Wirkungen intersiver Geruchsimmissionen.
Staub-Reinhalt. Luft 53, 425 – 431.
In “Luftverunreinigungen und geruchliche Wahrnehmungen unter besonderer Berücksichtigung von Innenräumen” (J. Fischer, N. Englert und B. Seifert, ed.), Umweltbundesamt, Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene, 1988.

[40] Stevens, S.S. (1975):
Psychophysics; Introduction to ist perceptual, neural, and social prospects.
New York; J. Wiley & Sons.
In VDI 3882 Blatt 1 (1992):
Olfaktometrie; Bestimmung der Geruchsintensität;
Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 1992.

[41] Stone, H. & Bosley , J.J. (1965):
Olfactory discrimination and Weber´s law;
Perception and Motor Skills, 20, 657-665.
In “Geschmack und Geruch” (K. J. Burdach, ed.)
1. Auflage, Verlag Hans Huber, Bern, Stuttgart, Toronto; 1988.

[42] Thiele, V. (1982):
Minderung von Geruchsstoff-Emissionen aus stationären Anlagen.
In “Luftverunreinigungen und geruchliche Wahrnehmungen unter besonderer Berücksichtigung von Innenräumen” (J. Fischer, N. Englert und B. Seifert, ed.),
Umweltbundesamt, Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene, 1988.

[43] VDI 3881 Blatt 1 (1986):
Olfaktometrie; Geruchsschwellenbestimmung Grundlagen,
Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 1986.

[44] VDI (1992)
VDI 3882, Bl. 1 Olfaktometrie: Bestimmung der Geruchsintensität
Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 1992.

[45] Wargocki, P. (1998):
Human Perception, Productivity and Symptoms Related to Indoor Air Quality;
Ph.D. Thesis, ET-Ph.D. 98-03 ;
Centre for Indoor Environment and Energy Department of Energy Engineering,
Technical University of Denmark, August 1998.

[46] Weber, E. H. (1850):
Der Tastsinn und das Gemeingefühl;
In „Experimentelle Untersuchung zur Berechnung der Empfundenen Luftqualität“ (O. Böttcher, 2003),
Dissertation 2003, Technischen Universität Berlin;
VDI Verlag GmbH, Fortschritt-Berichte VDI,
Umwelttechnik Reihe 15, Nr. 243, Düsseldorf 2003.

[47] Winneke, G.; Plattig, K. H.; Brandl, U.; Berresheim, H. W. (1986):
Extra-olfaktorische Wirkungen geruchsintensiver Stoffe.
In “Luftverunreinigungen und geruchliche Wahrnehmungen unter besonderer Berücksichtigung von Innenräumen” (J. Fischer, N. Englert und B. Seifert, ed.),
Umweltbundesamt, Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene, 1988.

[48] Winneke, G. (1994):
Geruchsstoffe
In “Luftverunreinigungen und geruchliche Wahrnehmungen unter besonderer Berücksichtigung von Innenräumen” (J. Fischer, N. Englert und B. Seifert, ed.),
Umweltbundesamt, Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene, 1988.

[49] Yaglou, C. P.; Riley, E. C.; Coggins, D. I. (1980):
Ventilation Requirements
A.S.H.V.E. Transactions, Vol. 42 (1936), S. 133 - 162
In „Ein Beitrag zu Fragen der Empfundenen Luftqualität in Gebäuden“ (U. Finke)
Dissertation 1996, Technischen Universität Berlin.

[50] Zimmermann, M. (1980):
Neurophysiologie sensorischer Systeme
In „Geschmack und Geruch; Gustatorische, olfaktorische und trigeminale Wahrnehmung“ (K. J. Burdach, ed.)
Verlag Hans Huber, Bern Stuttgart Toronto, 1. Auflage, 1988.