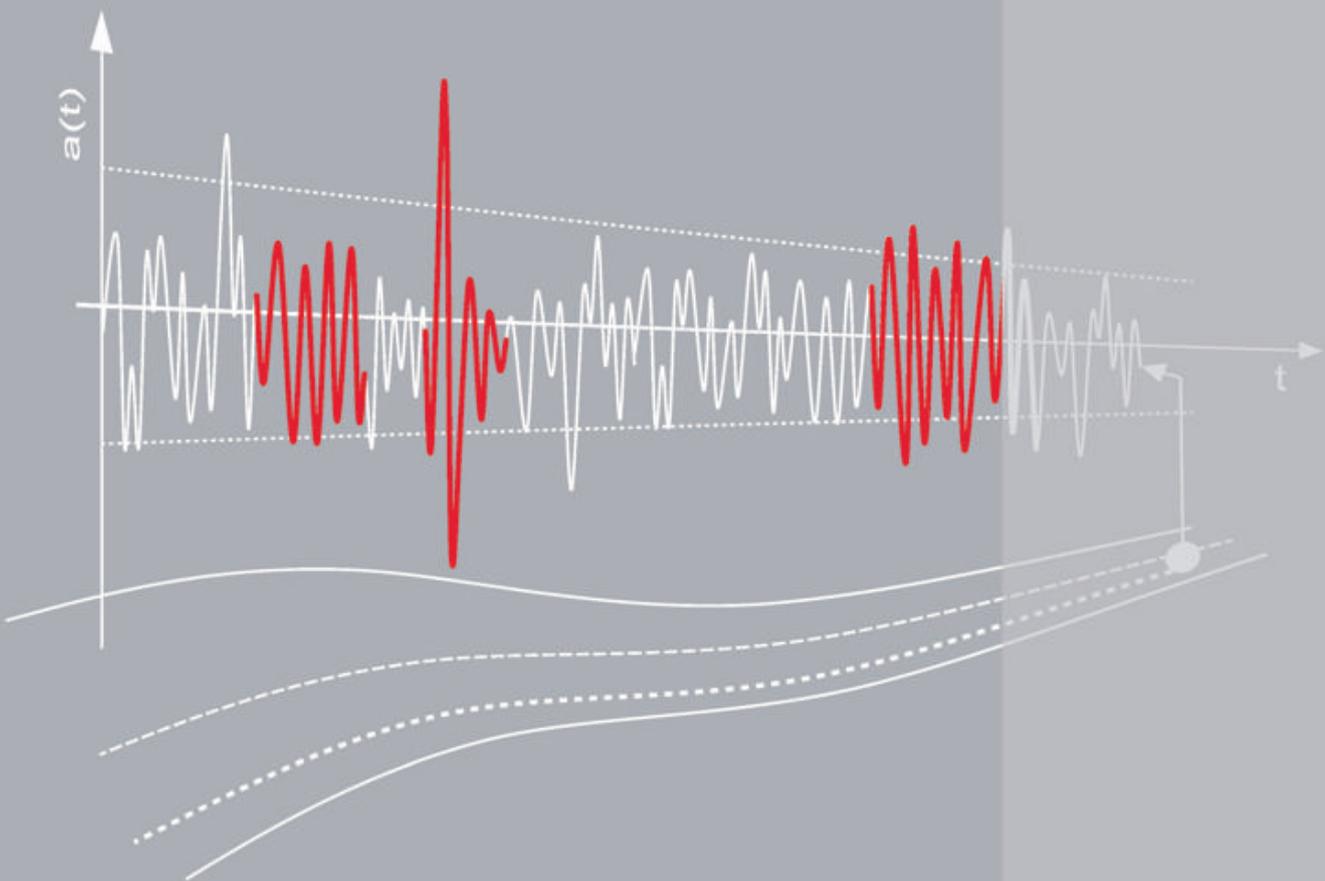




Objektivierung des Schwingungskomforts bei instationärer Fahr- bahnanregung

Peter Knauer



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

Objektivierung des Schwingungskomforts bei instationärer Fahrbahnanregung

Dipl.-Ing. Peter Knauer

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Heißing
2. Univ.-Prof. Dr. rer.nat. Heiner Bubb, i.R.

Die Dissertation wurde am 09.03.2010 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 13.07.2010 angenommen.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2010

Zugl.: (TU) München, Diss., 2010

978-3-86955-521-8

Audi-Dissertationsreihe, Band 40

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2010

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2010

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-521-8

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner Zeit am INI.TUM (INGOLSTADT INSTITUTE DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN) als Assistent am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik entstanden.

Es gibt zahlreiche Personen, die zum Gelingen der Arbeit, aber auch zu meiner persönlichen Entwicklung beigetragen haben. Ich möchte zunächst meinem Doktorvater Professor Bernd Heißing für die fortlaufende Unterstützung und die wertvollen fachlichen sowie außerfachlichen Ratschläge danken. Für die Betreuung und Zusammenarbeit innerhalb der Audi AG gilt mein Dank Dr. Friedemann Vogel, der durch seine Initiative diese Arbeit erst ermöglichte. Desweiteren möchte ich mich bei Professor Heiner Bubb für die Übernahme der Zweitkorrektur und bei Professor Willibald A. Günthner für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bedanken.

Ein großer Dank geht an Michael Botsch, Tilo Koch, Albert Schlecht und Martin Stemmer, die mit hohem zeitlichen Einsatz an den vielen Versuchen am Prüfstand teilgenommen und durch inhaltliche Diskussionen zum Erfolg der Experimente beigetragen haben. In diesem Zusammenhang möchte ich es auch nicht versäumen, Andreas Ampferl und Thomas Ball für die immer währende, aber nie selbstverständliche Funktion der Prüfstandstechnik zu danken. Außerdem gilt mein Dank Dr. Uwe Koser und Dr. Peter-Felix Tropschuh für die Organisation und Unterstützung am INI.TUM. Meinen Kollegen am INI.TUM und am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik danke ich für die vielen gemeinsamen Aktivitäten, die fachübergreifenden Denkanstöße und die schöne Zeit.

Einen ganz besonderen Dank möchte ich an meine Mutter, Sigrid Knauer, richten, die durch zahlreiches Korrekturlesen nicht nur Schreibfehler innerhalb der Arbeit korrigierte, sondern auch jede Formel hinterfragte und jede Abbildung kritisch betrachtete. Ihr und meinem Vater, Hermann Knauer, danke ich persönlich, dass sie mir immer einen inneren Rückhalt gegeben haben und ich nach wie vor auf ihre Unterstützung bauen kann.

Ingolstadt, September 2010

Inhaltsverzeichnis

Liste häufig verwendeter Abkürzungen	v
1. Einleitung	1
1.1 Was ist Komfort?	1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung	2
1.3 Herangehensweise	3
1.4 Grenzen der Aufgabenstellung	5
1.5 Anregungsquellen	8
1.6 Aufbau der Arbeit	9
2. Die menschliche Wahrnehmung	11
2.1 Physiologie	11
2.1.1 Mechanorezeptoren der Haut	11
2.1.2 Der Vestibularapparat	12
2.2 Vom Reiz zur Wahrnehmung	12
2.3 Beanspruchung des Menschen durch mechanische Schwingungen	14
3. Wissensstand	17
3.1 Normen	17
3.2 Korrelative Ansätze	19
3.3 Menschmodelle	24
3.4 Diskussion der Ansätze	27
4. Beschreibung und Charakterisierung realer Strecken	31
4.1 Beschreibung der Anregung durch Fahrbahn und Reifen	31
4.2 Charakterisierung realer Strecken	35
5. Komfortrelevanz	37
5.1 Ansätze der Psychoakustik	37
5.2 Übergang zur Vibrationswahrnehmung	39
6. Versuchsaufbau	43
6.1 Flachbahnkomfortprüfstand	43
6.1.1 Aufbau und Eigenschaften des Prüfstandes	43
6.1.2 Iteration auf beliebige Response-Kanäle	44
6.2 Messaufbau	46
6.2.1 Beschleunigungsaufnehmer	46
6.2.2 Messfahrzeug	47

7. Strukturierung der Versuche	49
7.1 Grundanregung	49
7.2 Detektion und Bewertung	51
7.3 Definition komfortrelevanter Beurteilungskriterien	52
7.4 Personenkollektiv	55
8. Versuchsdurchführung und Auswertung	57
8.1 Maskierte Sinusanregung	57
8.1.1 Vorbetrachtungen zu Perzeptionsschwellen	57
8.1.2 Frequenzgruppen	59
8.1.3 Ermittlung der Perzeptionsschwellen	64
8.1.4 Gerade wahrnehmbare Unterschiede im Pegel	66
8.2 Variation von Frequenzbändern	72
8.3 Impulse	78
8.3.1 Perzeptionsschwellen	78
8.3.2 Gerade wahrnehmbare Unterschiede im Pegel	80
8.4 Nachprellen von Impulsen	82
8.4.1 Perzeptionsschwellen	83
8.4.2 Gerade wahrnehmbare Unterschiede im Pegel	86
8.5 Diskussion der Ergebnisse	90
8.6 Anwendung der Ergebnisse am Beispiel	94
9. Komfortbewertung mittels Random Forests	101
9.1 Grundlagen der Random Forests	101
9.1.1 Entscheidungsbäume	101
9.1.2 Anwendung der Entscheidungsbäume auf Zeitsignale	103
9.1.3 Übergang zum Random Forest	104
9.2 Anwendung der Random Forests auf den Schwingungskomfort	106
9.2.1 Bewertung von Impulsen	107
9.2.2 Bewertung von Sequenzen	110
9.3 Diskussion	111
10. Zusammenfassung und Ausblick	113
Anhang	117
A1. Maskierung einer Sinusschwingung	117
A2. Variation von Frequenzbändern	121
A3. Entropie und Information Gain	125
A4. Bewertung von Impulsen mittels Random Forests	126
A5. Bewertung von Sequenzen mittels Random Forests	127
Literaturverzeichnis	129

Liste häufig verwendeter Abkürzungen

a	Beschleunigungssignal
\hat{a}	Amplitude der Beschleunigung
\tilde{a}	Effektivwert der Beschleunigung
$a_{1/2/3}$	Parameter der Trennfläche
\tilde{a}_B	Effektivwert des Frequenzbandes (weißes Rauschen)
$\tilde{a}_{B-S/R}$	Effektivwert des Frequenzbandes (weißes Rauschen) auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne
\tilde{a}_{FB}	Effektivwert des Frequenzbandes
$\tilde{a}_{FB_{max}}$	maximaler Effektivwert des Frequenzbandes
$\tilde{a}_{FB_{min}}$	minimaler Effektivwert des Frequenzbandes
\tilde{a}_{FBs}	Effektivwert des gestuften weißen Rauschens
\tilde{a}_{FB}^*	minimaler Effektivwert bei einem Stufensprung des bandbegrenzten Rauschens
$\tilde{a}_{FB-S/R}^*$	minimaler Effektivwert bei einem Stufensprung des bandbegrenzten Rauschens auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne
\tilde{a}_H	Effektivwert der harmonischen Anregung
\tilde{a}_{Hs}	gestuftes Sinussignal
\tilde{a}_H^*	minimaler Effektivwert bei einem Stufensprung der harmonischen Schwingung
$\tilde{a}_{H_{min}}$	Minimalwert des Effektivwertes der harmonischen Anregung
$\tilde{a}_{H_{max}}$	Maximalwert des Effektivwertes der harmonischen Anregung
$\tilde{a}_{H-S/R}^*$	minimaler Effektivwert bei einem Stufensprung der harmonischen Schwingung auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne
$\tilde{a}_{H-S/R}$	Effektivwert der harmonischen Anregung auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne
\hat{a}_I	Amplitude des Impulses
$\hat{a}_{I-S/R}$	Amplitude des Impulses auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne
$\bar{a}_{I-S/R}$	optimale Trenngerade zwischen als Impuls detektierten und nicht als Impuls detektierten Amplituden auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne
a_j	j-tes Attribut
\tilde{a}_{st}	Effektivwert der stochastischen Anregung
$\tilde{a}_{st_{min}}$	Minimalwert des Effektivwertes der stochastischen Anregung
$\tilde{a}_{st_{max}}$	Maximalwert des Effektivwertes der stochastischen Anregung
$\tilde{a}_{st-S/R}$	Effektivwert der stochastischen Anregung auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne
\tilde{a}_{st-S/R_w}	mit $W_{H-S/R}$ gewichteter Effektivwert der stochastischen Anregung auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne

a_w	frequenzbewertete Beschleunigung nach ISO2631
\tilde{a}_w	Effektivwert der frequenzbewerteten Beschleunigung
$\tilde{a}_{w\tau}$	gleitender Effektivwert der frequenzbewerteten Beschleunigung mit Wichtung zurückliegender Anteile
A	Frequenzspektrum der Beschleunigung a
$A1, A2, A3$	Bezeichnung der Rauschsignale
AFC	Alternative Forced Choice
B	Bewertungsfunktion
B_G	Bandbreite der Frequenzgruppen (Akustik)
B_E	Bewertungseinheit
B_{soll}	subjektive Bewertung (Zielgröße)
B_{RF}	Bewertung durch den Random Forest
BMI	Body-Mass-Index
c	Reizabhängige Konstante
c_{ij}	Wichtungsfaktoren innerhalb eines neuronalen Netzes
d	detektiert
$d\hat{a}$	Amplitudenunterschied
$d\hat{a}_{I-S/R}$	Amplitudenunterschied eines Impulses auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne
$d\bar{a}_{I-S/R}$	optimale Trennfläche zwischen detektierten und nicht detektierten Amplitudenunterschieden eines Impulses auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne
$d\tilde{a}_{FB}$	Unterschied im Effektivwert des Frequenzbandes
$d\tilde{a}_{FB-S/R}$	Unterschied im Effektivwert des Frequenzbandes auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne
$d\bar{a}_{FB}$	optimale Trennfläche zwischen detektierten und nicht detektierten Unterschieden im Effektivwert des Frequenzbandes
$d\bar{a}_{FB-S/R}$	optimale Trennfläche zwischen detektierten und nicht detektierten Unterschieden im Effektivwert des Frequenzbandes auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne
$d\tilde{a}_{H-S/R}$	Amplitudenunterschied der harmonischen Schwingung auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne
$d\bar{a}_H$	optimale Trennfläche zwischen detektierten und nicht detektierten Amplitudenunterschieden einer harmonischen Schwingung
$d\bar{a}_{H-S/R}$	optimale Trennfläche zwischen detektierten und nicht detektierten Amplitudenunterschieden einer harmonischen Schwingung auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne
$d\tilde{a}$	Unterschied im Effektivwert
df	Frequenzunterschied
df_B	Frequenzbandbreite
$d\bar{K}_S$	optimale Trennfläche des Sequenzkennwertes zwischen detektierten und nicht detektierten Sequenzen
$d\bar{K}_{S-S/R}$	optimale Trennfläche des Sequenzkennwertes zwischen detektierten und nicht detektierten Sequenzen auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne

DF	gerade Wahrnehmbare Unterschiede in der Frequenz
DL	gerade Wahrnehmbare Unterschiede im Pegel
DL_H	gerade Wahrnehmbare Unterschiede im Pegel von harmonischen Schwingungen
$DL_{H-S/R}$	gerade Wahrnehmbare Unterschiede im Pegel von harmonischen Schwingungen auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne
DL_I	gerade Wahrnehmbare Unterschiede der Amplitude von Impulsen
$DL_{I-S/R}$	gerade Wahrnehmbare Unterschiede der Amplitude von Impulsen auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne
DL_{FB}	gerade Wahrnehmbare Unterschiede im Pegel von Frequenzbändern
$DL_{FB-S/R}$	gerade Wahrnehmbare Unterschiede im Pegel von Frequenzbändern auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne
DL_S	gerade Wahrnehmbare Unterschiede des Kennwerts K_S von Sequenzen
$DL_{S-S/R}$	gerade Wahrnehmbare Unterschiede des Kennwerts K_S von Sequenzen auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne
E	subjektive Empfindung
f	Frequenz
f	Verteilungsdichte der Amplituden
f_B	Frequenzbandbreite des weißen Rauschens
f_H	Frequenz der harmonischen Schwingung
f_o	obere Grenzfrequenz
f_u	untere Grenzfrequenz
f_M	Mittelfrequenz
F	Faktor
FE	Finite Elemente
FFT	Fast Fourier Transformation
h	Höhenfunktion der Oberflächenstruktur der Fahrbahn
\tilde{h}	Effektivwert der Höhenfunktion
h_R	Rauschenterm des Höhenprofils
h_z	Höhenprofil angeregt durch die Hydrozylinder
H	Frequenzspektrum der Höhenfunktion h
H	Entropie des Zielattributs
I	Informationsgehalt einer Nachricht
IF	Instationaritätsfaktor
IG	Information Gain/ Informationszuwachs
k_i	i-ter Kunde
k_x, k_y, k_z	Wichtungsfaktoren für mehrachsige Einpunktanregung nach ISO2631
K_{erw}	erweiterter K-Wert nach Hennecke
K bzw. K_{VDI}	K-Wert nach VDI2057 (von 1987)
KNN	künstlich neuronale Netze
K_S	Sequenzkennwert
$K_{S-S/R}$	Sequenzkennwert auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne

$\bar{K}_{S-S/R}$	optimale Trennfläche des Sequenzkennwertes zwischen detektierten und nicht detektierten Sequenzen auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne
L	Schalldruckpegel
M	Merkmale
M_i	i-tes Merkmal
MKS	Mehrkörpersimulation
MP	MPEG-1 Audio Layer 3, Dateiformat
nd	nicht detektiert
N_i	i-te Zeitreihe
N_H	Bewertung der Harmonischen Schwingung (Note)
N_I	Bewertung des Impulses (Note)
N_{ref}	Referenznote
N_S	Bewertung der Sequenz (Note)
ooB	Out-Off-Box
p	Auftrittswahrscheinlichkeit
PS	Perzeptionsschwelle
PS_H	Perzeptionsschwelle von harmonischen Schwingungen
$PS_{H-S/R}$	Perzeptionsschwelle von harmonischen Schwingungen auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne
PS_I	Perzeptionsschwelle von Impulsen
$PS_{I-S/R}$	Perzeptionsschwelle von Impulsen auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne
PS_S	Perzeptionsschwelle von Sequenzen
$PS_{S-S/R}$	Perzeptionsschwelle von Sequenzen auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne
R	Reizstärke
R_0	Wahrnehmbarkeitsschwelle
RL	Rückenlehne
RF	Random Forest
RF_H	Random Forest für harmonische Schwingungen
RF_I	Random Forest für Impulse
RF_S	Random Forest für Sequenzen
s	Weg
\hat{s}	Amplitude des Weges
SL	Sitzlehne
SR	Schwingungsrichtung
t	Zeit
t_{inc}	Anstiegszeit der harmonischen Schwingung
t_W	Wahrnehmungszeitpunkt
T	Dauer des Signals
TF	Transferfunktion bzw. Übertragungsfunktion
v	Geschwindigkeit
v_{ik}	Wert des Zielattributs z_k
\hat{v}	Amplitude der Geschwindigkeit
V	Frequenzspektrum der Geschwindigkeit

V	Qualitätsmaß für die Güte der Klassifikation
$V_{SF/RL}$	Qualitätsmaß für die Güte der Klassifikation auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne
w	Welligkeit
w_{ij}	Wert des Attributs a_j
W	messpunkt- und richtungsabhängige Filterfunktion nach ISO2631
W	Einfluss des Merkmals auf die Klassifikation
$W_{H-S/R}$	Wichtungsfunktion der Frequenzanteile eines Rauschens in unmittelbarer Umgebung der Frequenz einer harmonischen Schwingung auf der Sitzfläche bzw. an der Rückenlehne
z	Anzahl der möglichen Zeichen
z_k	k-tes Zielattribut
Z_k	k-tes Zielattribut
β	Kurtosis
Δf	Frequenzabstand
μ_k	Zentralmoment k-ter Ordnung
ω	Kreisfrequenz
Ω	Wegkreisfrequenz
Ω_0	Bezugswegkreisfrequenz
σ	Standardabweichung
ϕ	Phasengang eines Spektrums
Φ	spektrale Leistungsdichte
$\Phi_h(\Omega_0)$ bzw. $\Phi(\Omega_0)$	Unebenheitsmaß

1. Einleitung

Personenkraftwagen haben heutzutage einen hohen technischen Stand erreicht. Neben Kriterien wie Design, Preis, Verbrauch oder Sicherheit ist auch der Komfort ein wichtiges Verkaufsargument.

1.1 Was ist Komfort?

Im Vorfeld dieser Untersuchungen ist zunächst zu klären, was unter dem weitreichenden Begriff des Komforts verstanden wird. 1958 hat Herzberg Komfort als die Abwesenheit von Diskomfort definiert. Diese lineare Abhängigkeit beider Begriffe wurde 1996 von Zhang, Helander und Dury [1] widerlegt. Sie konnten zeigen, dass Komfort und Diskomfort unabhängige Dimensionen haben, also orthogonale Größen darstellen (siehe Abb. 1.1). Während Diskomfort auf physiologische und biomechanische Faktoren zurückzuführen ist und somit das „Erleiden“ äußerer Umstände beschreibt, ist Komfort ein Begriff des „Gefallens“ der mit ästhetischen Aspekten in Verbindung gebracht wird. Auf naturwissenschaftlichem Weg lässt sich nur der Diskomfort gezielt untersuchen, da der Komfort durch individuelle Vorlieben geprägt ist und sich somit einer Objektivierung entzieht. Entsprechend der Bedürfnispyramide nach Maslow gibt Bubb eine Komfortpyramide zur Hand [2], welche die Hierarchieebenen des Diskomforts aufzeigt.

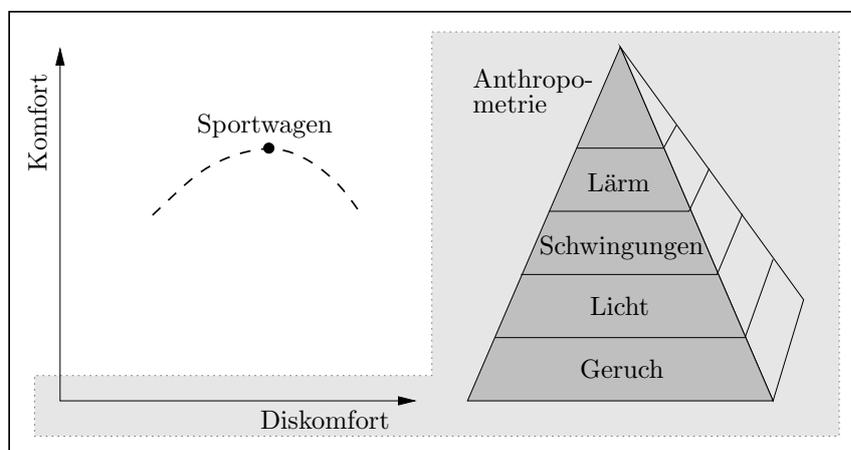


Abb. 1.1: **links:** Komfort-Diskomfort-Kennfeld nach [1] **rechts:** Komfortpyramide nach Bubb [2]

Für den Automobilhersteller besteht die Aufgabe darin, einen für den Charakter des Fahrzeugs optimalen Punkt im Kennfeld nach Abb. 1.1 festzulegen. Es ist durchaus denkbar, dass einem Sportwagen die unterbrochene Linie aus Abb. 1.1 zuzuordnen ist. Wäre das Auto leiser und hätte weichere Sitze würde sich das Diskomfortlevel reduzieren, was jedoch nicht zum Charakter eines Sportwagens passen und somit nicht mehr so gut „gefallen“ (Komfort) würde.

Die Komfortpyramide bildet die wesentliche Grundlage, um den Diskomfort im Fahrzeug in geeigneter Weise zu beeinflussen. Sind die Ansprüche des Fahrers bezüglich des Geruchs