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 Ojektivierung entzieht. Entsprechend der Bedürfnisspyramide nach Maslow gibt Bubb eine Komfortpyramide zur Hand [2], welche die Hierarchieebenen des Diskomforts aufzeigt.

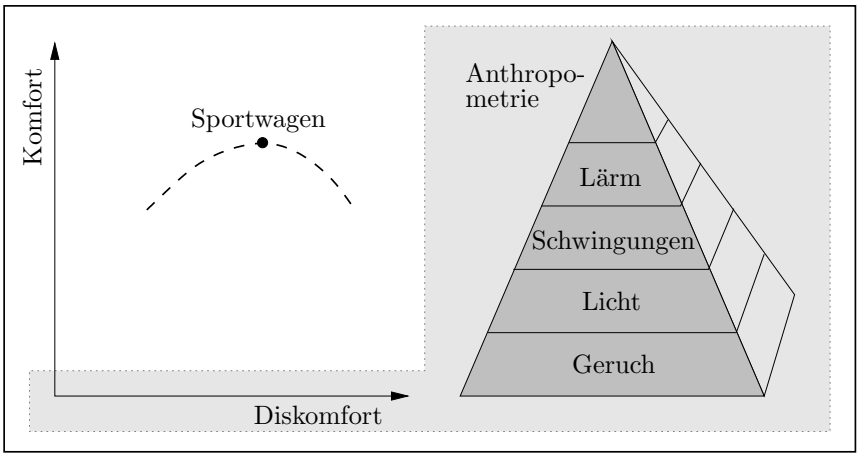

Abb. 1.1: **links:** Komfort-Diskomfort-Kennfeld nach [1] **rechts:** Komfortpyramide nach Bubb [2]

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

und der Lichtverhältnisse erfüllt, bilden Schwingungen die nächste Bedürfnissebene. In der überwiegenden Zahl der Fälle besteht die Aufgabe darin, deren Einfluss auf den Diskomfort zu minimieren. Hierzu werden Testfahrer eingesetzt, deren Urteil eine schrittweise Parametrierung der schwingungsbeeinflussenden Komponenten des Fahrzeugs zur Folge hat.
Bei der vorgenommenen Betrachtung der Schwingungen auf dem Fahrzeugsitz spricht man auch von „dynamischem Sitzkomfort“, wohingegen der „statische Sitzkomfort“ vorwiegend die Sitzdruckverteilung beschreibt.

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Die Beurteilung des Schwingungsdiskomforts (im Folgenden als Schwingungskomfort bezeichnet) durch Testfahrer ist stark subjektiv geprägt. Zudem kann eine Bewertung erst am fertigen Fahrzeug und nicht schon in der Konzeptionsphase vorgenommen werden. Für eine gezielte Entwicklungsarbeit wäre somit die Bewertung auf Basis messbarer und damit objektiver Kenngrößen wünschenswert. Es existieren bereits zahlreiche Ansätze, die dieses Ziel der objektiven Beurteilung von Schwingungen auf beliebigen Straßen verfolgen. In [3] wurde jedoch schon festgestellt, dass eine Korrelation der berechneten Bewertungsgrößen zu den Subjektivurteilen in den seltensten Fällen gefunden werden kann.

	Anregungspunkte und -richtungen	Berücksichtigung stoch. Anregungen	Berücksichtigung transienter Anteile	Summationsformel für mehrere Anregungspkt.	Bewertung im Frequenzbereich	Berücksichtigung Amplitudeneigenschft.	Berücksichtigung sequentieller Eigenschft.
K-Wert	für den sitzenden Menschen in x-, y- und z-Richtung				✓		
bewertete Schwingstärke a_w	Sitzkissen - x, y, z Füße - x, y, z Hände - z Rückenlehne - x Nicken Wanken Gieren			✓	✓		
Cucuz	Sitzkissen - z Füße - z Hände - z	✓	✓	✓	✓		
Klingner	Sitzkissen - x, y, z Füße - x, y, z Hände - z Rückenlehne - x,y Nicken Wanken	✓		✓	✓		
Hennecke	Sitzkissen - z Nicken	✓	✓	✓	✓	✓	

Tab. 1.1: Vergleich ausgewählter Ansätze zur Komfortbewertung

Erfahrungen mit Testfahrern haben gezeigt, dass Anregungen, deren Charakter sich über der Zeit nicht ändert (stationäre Anregungen), hinsichtlich des Schwingungskomforts schlecht oder gar nicht bewertet werden können. Aufgrund fehlender einprägsamer Merkmale der Strecke, anhand derer Unterschiede von Fahrzeugen und Fahrzeugvarianten detektiert werden, kann kein Absolutniveau für die Beurteilung gefunden werden. Mathematische Auswerteverfahren hingegen, wie die Spektralanalyse oder eine Effektivwertbildung, ermöglich hier häufig eine klare Beurteilung anhand eines einfachen Amplituden- oder Pegelvergleichs. Stationäre Anregungen können fast ausschließlich auf dem Prüfstand erzeugt werden, da der Charakter öffentlicher Straßen meist instationär ist, die Eigenschaften der Strecke also über der Zeit variieren. Neben Änderungen im Amplituden- und Frequenzinhalt haben auch transiente Ereignisse (Impulse) wesentlichen Anteil am Oberflächenprofil instationärer Strecken.
So besitzt der überwiegende Teil realer Strecken charakteristische Abschnitte, anhand derer es Testfahrern deutlich leichter fällt Unterschiede zwischen Fahrzeugen und Fahrzeugvarianten zu detektieren. Dieser Grundansatz der selektiven Wahrnehmung ausgewählter Merkmale der Anregung hat sich auch im Gespräch mit Experten bestätigt. Ein überwiegender Anteil der Strecke hat keinen Einfluss auf die Bewertung, sondern dient lediglich zum gedanklichen Abspeichern des Wahrgenommenen.

Diesem Konflikt zwischen gut messbaren Strecken auf der einen Seite und gut beurteilbaren Strecken auf der anderen Seite soll in dieser Arbeit durch eine zielgerichtete Auswertung instationärer Zeitverläufe hinsichtlich komfortrelevanter Informationen begegnet werden. Tab. 1.1 zeigt, das keiner der dargestellten Komfortansätze sequentielle Eigenschaften (Instationaritäten) in Zeitsignalen berücksichtigt, was als eine wesentliche Ursache für die zum Teil schlechte Korrelation der berechneten (objektiven) Größen zu Subjektivurteilen angesehen wird.

In der vorliegenden Arbeit werden Zeitfilter entwickelt, welche komfortrelevante Abschnitte instationärer Strecken selektieren. Hierzu werden Perzeptionsschwellen beurteilungsrelevanter Phänomene bestimmt, welche anschließend um die Betrachtung der gerade wahrnehmbaren Unterschiede ergänzt werden.
Grundlage der Untersuchungen bildet die Minimierung des Diskomforts. Die nicht quantifizierbaren Kenngrößen des Komforts müssen außer Acht gelassen werden, was im Sinne einer objektiven Entwicklung des Fahrzeugs jedoch zielführend ist.

1.3 Herangehensweise

Das Fahrzeug wird in Abhängigkeit seiner Geschwindigkeit und dem Oberflächenprofil der Fahrbahn zu Schwingungen angeregt, die über verschiedene Transferpfade zu den Schnittstellen zwischen Fahrer und Fahrzeug weitergeleitet werden. Abb. 1.2 zeigt drei Vorgehensweisen (grau hinterlegte Bereiche), wie ausgehend von diesen Schnittstellensignalen eine objektive Bewertung erfolgen kann.
Der hier mit „1“ gekennzeichnete Weg stellt die am weitesten verbreitete Methode zur Komfortbeurteilung von Schwingungsphänomenen dar. Aus den Schnittstellensignalen werden mit Hilfe verschiedener Algorithmen Kenngrößen generiert, welche einen mathematischen Zusammenhang zu den dabei ermittelten Subjektivurteilen aufweisen. Auf

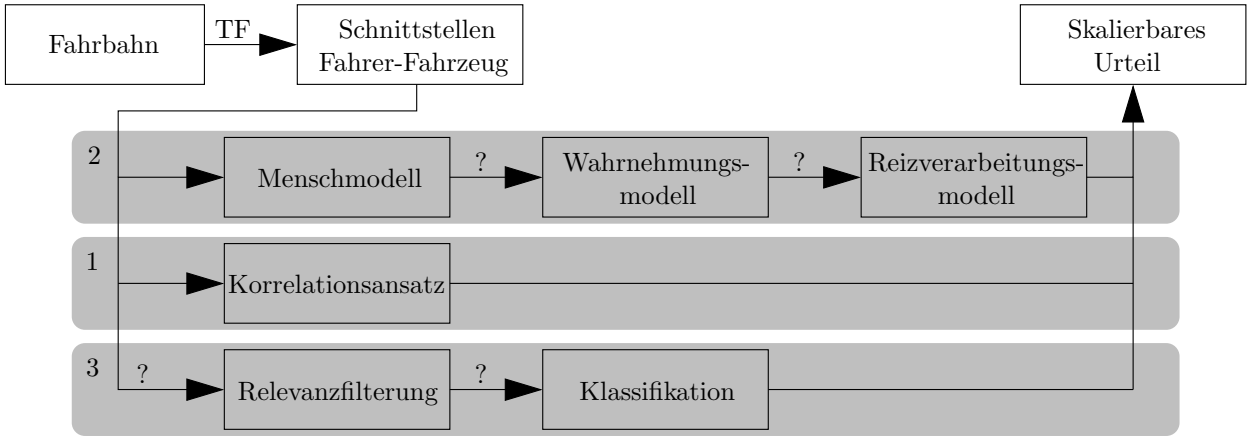

Abb. 1.2: Ansätze zur Objektivierung des Schwingungskomfortempfindens

einige ausgewählte Ansätze wird im Kapitel 3 noch genauer eingegangen. Wie schon im Abschnitt 1.2 angedeutet, besteht ein wesentliches Problem dieser Ansätze darin, dass Instationaritäten kaum Berücksichtigung finden.

In den letzten Jahren hat die Modellierung des menschlichen Körpers enorme Fortschritte gemacht. Auf diese Weise wird die Anregung des Fahrers transparent - Kräfte und Spannungen innerhalb des menschlichen Körpers werden berechenbar. Auf dem Weg zum skalierbaren Urteil, welcher in Abb. 1.2 mit „2“ gekennzeichnet wurde, bestehen jedoch noch zwei wesentliche aber derzeit ungelöste Herausforderungen. Zum Ersten ist noch nicht ausreichend bekannt, welche Relevanz die berechneten Kräfte und Spannungen für die Wahrnehmung haben. Es besteht somit zunächst der Bedarf nach einem geeigneten Wahrnehmungsmodells. Um ein Schwingungskomforturteil zu quantifizieren stellt sich zum Zweiten die Frage nach der Weitervarbeitung der ermittelten, relevanten Informationen (Reizverarbeitungsmodell).
Die umfassende Modellierung des menschlichen Körpers, der Wahrnehmung sowie der Reizverarbeitung wird in Zukunft sicher zu den Forschungskernpunkten auf dem Gebiet der Objektivierung des Schwingunskomforts gehören. Da dieser Weg jedoch mit vielen Fragezeichen versehen ist, und eine Lösung der bestehenden Probleme auch in den nächsten Jahren nicht angenommen wird, soll in dieser Arbeit ein dritter Ansatz vorgeschlagen werden (in Abb. 1.2 mit „3“ bezeichnet).

Wie schon im Abschnitt 1.2 formuliert, wird angenommen, dass die Schnittstellensignale zwischen Fahrer und Fahrzeug Informationen enthalten, die für die Beurteilung des Schwingungskomforts nicht relevant sind. Gelingt es nun mittels geeigneter Filter nur die komfortrelevanten Informationen zu selektieren, können daraus Kenngrößen (Merkmale) erzeugt und deren Zusammenhang zum subjektiven Empfinden untersucht werden.
Beim Übergang von n Merkmalen zu einem quantifizierbaren Komforturteil handelt es sich um ein typisches Klassifikationsproblem womit der Einsatz maschineller Lernverfahren naheliegend ist, und anhand der Bewertung ausgewählter Anregungen untersucht werden soll. Im Speziellen kommt hier die Methode der Random Forests zum Einsatz (siehe Kapitel 9).

Die Erarbeitung der Filteralgorithmen wird in zwei Teilaufgaben untergliedert,

- die Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle und
- die Reizbewertung, in Form der gerade wahrnehmbaren Unterschiede

ausgewählter Merkmale der Anregung.

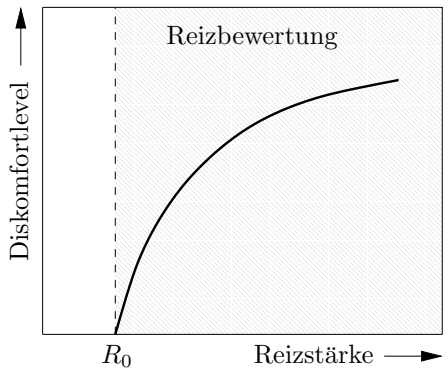

Abb. 1.3: Zusammenhang zwischen Reizstärke und Empfindung

Die Wahrnehmungsschwelle (oder auch Perzeptionsschwelle) gibt an, wie „stark“ ein Reiz mindestens sein muss, um vom Probanden detektiert werden zu können. Derartige Perzeptionsschwellen existieren bisher vorwiegend für reine Sinusschwingungen (siehe u.a. [4], [5]). Da reale Straßenanregungen jedoch große Rauschanteile enthalten, ist diese Betrachtung nicht ausreichend. In der vorliegenden Arbeit sollen zunächst ausgewählte Signalbestandteile hinsichtlich ihrer Wahrnehmung bei vorhandener Maskierung (Grundrauschen) untersucht werden. Einige Experimente finden hierbei Anlehnung an das Wissensgebiet der Psychoakustik.
Erst wenn ein Reiz die Wahrnehmungsschwelle R_0 überschreitet, ist dessen Auswirkung auf das Diskomfortlevel bewertbar. Wie in Abb. 1.3 zu sehen, kann nicht von einem linearen Zusammenhang zwischen der Stärke des Reizes und dem Diskomfortlevel ausgegangen werden. Diese Aussage stützt sich auf das Weber-Fechnersche Gesetz:

$$E = c \cdot ln\frac{R}{R_0} \tag{1.1}$$

Die Empfindung E ist demnach eine logarithmische Funktion der Reizstärke R. Hierbei ist c eine von der Art des Reizes abhängige Größe. In der vorliegenden Arbeit soll auf Basis der gerade wahrnehmbaren Unterschiede der Zusammenhang zwischen der Reizstärke und dem Diskomfortlevel für ausgewählte Anregungen untersucht werden.

Für die Komfortbewertung eines realen Signals werden entsprechend Ansatz „3“ (siehe Abb. 1.2) zunächst ausgewählte Signalbestandteile gesucht, welche oberhalb der jeweiligen Wahrnehmbarkeitsschwelle liegen. Im Anschluss können diese Abschnitte auf Basis der gerade wahrnehmbaren Unterschiede bzw. mittels der Anwendung maschineller Lernverfahren bewertet werden.

1.4 Grenzen der Aufgabenstellung

Die Bewertung des Schwingungskomforts durch Probanden unterliegt einer Vielzahl von Einflüssen, welche in Abb. 1.4 dargestellt sind. Zunächst werden die Schwingungen an

den Schnittstellen zwischen Fahrer und Fahrzeug haptisch wahrgenommen. Auf die dabei beteiligten Rezeptoren wird genauer in den Abschnitten 2.1 und 2.2 eingegangen. Ab circa $15Hz$ können die anregenden Schwingungen jedoch auch vom Gehör verarbeitet werden. Der haptische und akustische Wahrnehmungsanteil als Funktion der Frequenz f ist qualitativ in Abb. 1.5 dargestellt [6]. Bei $80Hz$, was der am häufigsten genannten Grenze für die Betrachtung fühlbarer Vibrationen entspricht, liegt der Einfluss der Akustik auf die Wahrnehmung schon bei über 70%. Eine gezielte Entwicklung des Schwingungskomforts ist somit nur möglich, wenn die hörbaren Anteile keine Berücksichtigung finden.

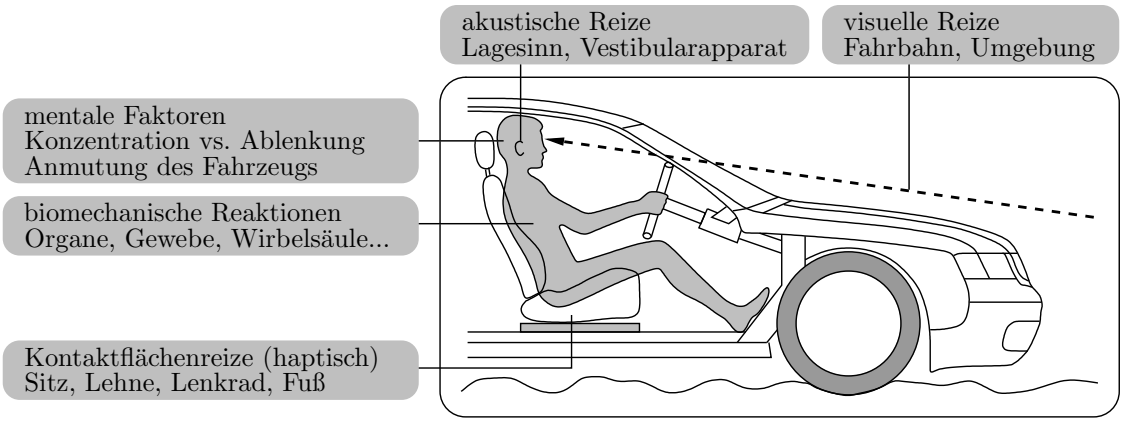

Abb. 1.4: Einflüsse auf das (individuelle) Komforturteil

Auch visuelle Reize der Oberflächenstruktur der Fahrbahn und der Umgebung können den Beurteilungsprozess beeinflussen. So ist beispielsweise bekannt, dass Schwingungen bis ca. $2Hz$ optisch wahrgenommen werden [7].
Sehr stark individuell sind die biomechanischen Reaktionen eines jeden Fahrers auf die jeweilige Anregung. Spezifische Größen wie das Alter, das Geschlecht, der Körperbau und viele mehr prägen das „Schwingungssystem Mensch“.
Mentale Faktoren sind ebenfalls als wesentliche Einflussgrößen für die Komfortbewertung zu nennen. Hierzu zählen Attribute des Komforts (des „Gefallens“) wie die Anmutung, das „Flair“ oder das „Image“ des Fahrzeugs. Aber auch situationsbezogene Randbedingungen, wie die Konzentration oder die Ablenkung des Fahrers werden der Gruppe der mentalen Faktoren zugeordnet.

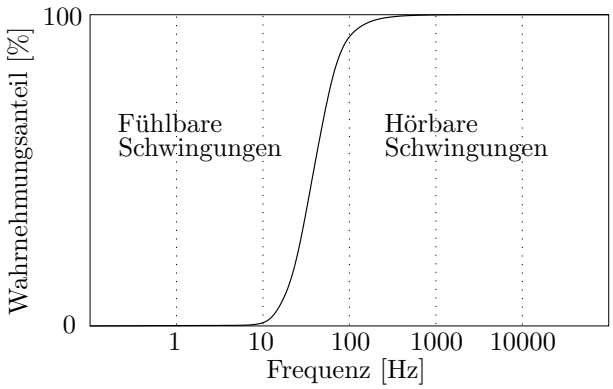

Abb. 1.5: Wahrnehmungsanteile Haptik vs. Akustik nach [6]

Eine Modellierung all dieser (individuell verschiedenen) Einflussgrößen ist nicht möglich und wäre auch für die objektive, nicht individuelle Komfortbewertung kaum zielführend.
Gerade mentale Faktoren besitzen wenig Informationsgehalt hinsichtlich der tatsächlich eingeleiteten Vibrationen und werden somit im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt.
Biomechanischen Reaktionen als Antwort auf die Anregung durch das Oberflächenprofil der Fahrbahn sind individuell stark verschieden. Ihr Einfluss auf die Wahrnehmung ist weitestgehend unbekannt. Sie können folglich nur dann unberücksichtigt bleiben, wenn entweder die Testpersonen einen ähnlichen Körperbau aufweisen, oder wenn ein Absolutabgleich auf Basis einheitlicher Zielvorgaben zwischen den Probanden stattgefunden hat („Kalibrierung" der Probanden).
Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen können nur Testpersonen eingesetzt werden, die in der Lage sind sich ausschließlich auf die haptische Wahrnehmung (Kontaktflächenreize) zu konzentrieren. Mentale Faktoren, akustische Reize und visuelle Reize der Umgebung dürfen keine Rolle spielen. Aufgrund dieser Anforderung, wurden in den durchgeführten Experimenten nur geübte Beurteiler zu Rate gezogen.
Ein Großteil der Versuche wurde auf dem Flachbahn-Komfortprüfstand (siehe Kapitel 6.1) durchgeführt. Dies hatte zur Folge, dass der Testperson keinerlei Informationen über die tatsächliche Anregung vorlagen und somit eine Absolutbewertung des Übertragungsverhaltens des Fahrzeugs nicht möglich war. Diese grundlegende Erkenntnis bedingt, dass alle Untersuchungen am Prüfstand als Relativvergleich zwischen verschiedenen Anregungessignalen ausgelegt werden müssen. Auf die Festlegung eines Absolutpegels wird im Kapitel 7.2 näher eingegangen.

Bisher wurden die auszuwertenden Messsignale nicht näher definiert. Wie schon oben formuliert, handelt es sich dabei um die Schnittstellensignale zwischen Mensch und Fahrzeug auf der Sitzfläche, an der Rückenlehne, an den Füßen und am Lenkrad jeweils in den drei Raumrichtungen x,y und z. Neben diesen rein translatorischen Komponenten gibt es die rotatorischen Anteile, Nicken, Wanken und Gieren.

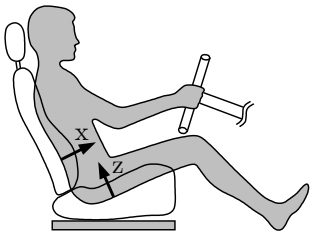

Abb. 1.6: Koordinatendefinition der Messpunkte

In der vorliegenden Arbeit wird von der Annahme ausgegangen, dass der überwiegende Teil des Komfortempfindens auf die translatorischen Beschleunigungssignale auf dem Sitz in z-Richtung sowie an der Rückenlehne in x-Richtung zurückzuführen ist (siehe Abb. 1.6). Diese Annahme geht einher mit Untersuchungen nach Klingner [8], der den Einfluss verschiedener Anregungspunkte auf das Schwingungskomfortempfinden untersuchte (siehe Abb. 3.1).
Griffin [9] konnte zeigen, dass die durch Wanken und Nicken hervorgerufenen translatorischen Anteile schon in einigen Zentimetern Abstand vom Drehpunkt das Schwingungsempfinden dominieren. Die rotatorischen Komponenten werden somit nicht berücksichtigt.
Tab. 1.2 fasst die Annahmen und Einschränkungen dieses Abschnitts kurz zusammen.

Testpersonen	⇒	Experten
Messsignale	⇒	Beschleunigungen
		- Sitzkissen, z-Richtung
		- Rückenlehne,x-Richtung
Urteil	⇒	Relativbewertung

Tab. 1.2: Annahmen und Einschränkungen

1.5 Anregungsquellen

Die gemessenen Beschleunigungssignale auf dem Sitz in z-Richtung als auch an der Rückenlehne in x-Richtung stellen eine Summation von Schwingungsbestandteilen unterschiedlichen Ursprungs dar (siehe Abb. 1.7).
Externe Anregungen bezeichnen dabei die von außen eingeprägten Unebenheiten durch das Höhenprofil der Fahrbahn.
Interne Anregungen entstammen dem Fahrzeug selbst, einerseits durch das Aggregat, andererseits durch den Rad-Reifen-Komplex [10].
Die rotierenden Massen des Motors erzeugen, abhängig von der Lage und der Anzahl der Zylinder, resultierende Lagerkräfte. Im stationären Fall handelt es sich dabei um rein periodische Signale entsprechend den Vielfachen der Motorordnung, was im Campbell-Diagramm besonders anschaulich wird ([11],[10]). Dynamische Vorgänge (z.B. abrupter Gaswechsel), erzeugen zudem transiente Anregungen mit anschließendem Ausschwingvorgang.

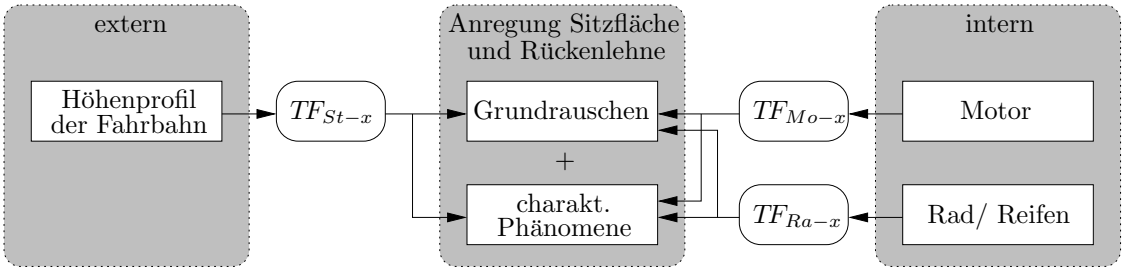

Abb. 1.7: Anregungsquellen

Durch Ungleichförmigkeiten am Rad-Reifen-Komplex ergeben sich Schwingungsanregungen, welche über die Radaufhängungen in die Karosserie eingeleitet werden. Im Falle eine Unwucht entstehen so Vertikalkräfte $F_U = m_u r_U \omega^2 \sin \omega t$ bei einer Frequenz von $f = v/2\pi R$ (siehe Abb. 1.8), wobei v die translatorische Geschwindigkeit und R den dynamischen Radius des Rades darstellt [10]. Liegen der geometrische Mittelpunkt M des Rades und der Durchstoßpunkt A der Achse nicht aufeinander, spricht man von Höhenschlag (siehe Abb. 1.8). Durch Diesen entstehen Anregungen der ersten und zweiten Radordnung [10].Aufgrund von Fertigungstoleranzen des Reifens kann es vorkommen, dass die in Abb. 1.8 dargestellten Elementarfedern unterschiedlich sind. Dabei entstehen wiederum harmonische Anregungen, welche über das Feder-Dämpfer-System in den Fahrzeugaufbau eingeleitet werden (siehe Abb. 1.8).
Auf der Sitzfläche und an der Rückenlehne ist die Summation all dieser Schwingungsanteile wirksam. In der vorliegenden Arbeit wird bei der Anregung zwischen dem Anteil des „Grundrauschens“ sowie verschiedenen „charakteristischen Ereignissen“unterschieden. Die Auswertungen erfolgen nur anhand der Komfortbewertungspunkte im Innenraum. Aufgrund des somit nicht berücksichtigten Übertragungsverhaltens vom Rad zu den Schnittstellen zwischen

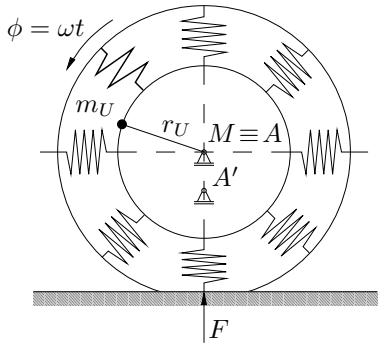

Abb. 1.8: mögliche Ungleichförmigkeiten des Rad-Reifen-Komplexes

Mensch und Fahrzeug, sind die Ursachen der Schwingungen, wie sie oben geschildert wurden, nicht ermittelbar. Sind im Signal beispielsweise harmonische Anteile enthalten, können diese vom Oberflächenprofil der Fahrbahn, vom Rad-Reifen-Komplex oder vom Motor herrühren. Für eine Relativbewertung, wie sie in der Entwicklung meist für den Vergleich bekannter Variationsumfänge angewendet wird, ist diese Herangehensweise jedoch zweckmäßig.

1.6 Aufbau der Arbeit

Abb. 1.9 gibt einen Überblick der Struktur der vorliegenden Arbeit.
Nach einer Einleitung im Kapitel 1 werden im Kapitel 2 zunächst physiologische Grundlagen zur Wahrnehmung des Menschen erläutert. Da der Mensch keinen Vibrationssinn besitzt, erfolgt die Detektion von Vibrationsreizen vorwiegend über die Mechanorezeptoren der Haut und den Vestibularapparat. Im Anschluss an diese physiologischen Betrachtungen wird auf wesentliche Aspekte der Neurobiologie eingegangen. Dabei wird besonders der zwingende Zusammenhang zwischen dem Bewusstwerden eines Reizes und dessen Wahrnehmung beleuchtet. Das Kapitel schließt mit einem Überblick verschiedener Untersuchungen zur Beanspruchung der menschlichen Skelettstruktur sowie verschiedener Organe durch mechanische Schwingungen.

Im Kapitel 3 werden zahlreiche Ansätze auf dem Gebiet der Schwingungskomfortobjektivierung vorgestellt. Neben korrelativen Ansätzen, welche im Wesentlichen auf der VDI-Norm 2057-1 bzw. ihrem internationalen Pendant ISO 2631-1 beruhen, gewinnt in jüngster Zeit die Simulation des statischen und dynamischen Sitzkomforts auf Basis von Modellen des menschlichen Körpers zunehmend an Bedeutung.
Aus diesen Betrachtungen werden in der vorliegenden Arbeit wesentliche Untersuchungsschwerpunkte zur Bewertung des Schwingungskomforts auf instationären Strecken abgeleitet.

Die Charakterisierung „realer Strecken“ sowie deren mathematische Beschreibung bilden den Inhalt des Kapitels 4. Dies ist eine wesentliche Grundlage für die Generierung der im Folgenden eingesetzten künstlichen Anregungssignale am Prüfstand.

In der Psychoakustik gibt es bereits zahlreiche Erkenntnisse zur Filterung akustisch relevanter Signalbestandteile. Im Kapitel 5 werden einige dieser Erkenntnisse vorgestellt und, aufbauend auf diesen, Untersuchungsansätze für den Vibrationskomfort abgeleitet.