

## **Beurteilung der zeitvarianten Beanspruchung des Menschen bei der Kraftfahrzeugführung in Feldstudien und Laboruntersuchungen\***

E. Haider und W. Rohmert

Institut für Arbeitswissenschaft der Technischen Hochschule Darmstadt  
(Direktor: Prof. Dr. W. Rohmert), Petersenstraße 30, D-6100 Darmstadt,  
Bundesrepublik Deutschland

### **Examination and Assessment of Time-Variant Human Strain in Motor Car Driving: Real Situation – Simulation**

**Summary.** Time variant processes of activity, activation and strain of man are registered during several hours of automobil driving (highway-autobahn) for different stress conditions and classified in terms of degrees of fatigue.

By comparison with an assessment of strain in a simulated driving task with the same individuum and the same research-methods it is shown that the development of methods for measurement and assessment of time-variant human processes in laboratory experiments can be recommended, field-studies however are necessary for validating the applied methods. In the field-studies higher degrees of strain were found than under laboratory conditions.

**Key words:** Automobil-driving – Field-studies – Laboratory experiments – Stress – Strain – Fatigue.

**Zusammenfassung.** Die zeitvarianten Veränderungen der Aktivität, Aktiviertheit und Beanspruchung des Menschen werden bei mehrstündigen Kraftfahrzeugführungsaufgaben auf Bundesautobahnen für unterschiedliche Belastungssituationen registriert und einer Klassifizierung in Ermüdungsgraden zugeführt.

Ein intraindividuelle Vergleich zu einer Beurteilung der Beanspruchung bei simulierter Kraftfahrzeugführung bei gleicher Versuchsmethodik zeigt, daß zwar eine Entwicklung von Meß- und Beurteilungsmethoden in Laborversuchen empfohlen werden kann, eine Validierung in Feldversuchen jedoch zwingend ist. Für die Feldversuche wurden in der vorliegenden Untersuchung höhere Ermüdungsgrade als unter Laborbedingungen nachgewiesen.

**Schlüsselwörter:** Kraftfahrzeugführung – Feldstudien – Laboruntersuchungen – Belastung – Beanspruchung – Ermüdung.

---

\* Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sei für die finanzielle Unterstützung der Untersuchungen herzlich gedankt

## 1. Zielsetzung

Die Analyse von Statistiken zu Unfallursachen bei der Führung von Kraftfahrzeugen zeigt, daß die technische Sicherheit bereits einen hohen Zuverlässigkeitsgrad erreicht hat und umweltbezogene Störeinflüsse (Straßenführung, Windböen, etc.) auf das Arbeitssystem Mensch–Kraftfahrzeug nur zu einem geringen Prozentsatz für Unfälle verantwortlich gemacht werden. Etwa 90% der Unfallursachen werden jedoch in der einschlägigen Literatur auf menschliches Versagen (z. B. Unaufmerksamkeit, Fehleinschätzungen) zurückgeführt (Brenken, 1971) und zeigen damit die Notwendigkeit der Untersuchung inter- und intraindividuelle Verhaltensunterschiede auf.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung soll das intraindividuelle Aktivitäts-, Aktiviertheits- und Beanspruchungsverhalten einer Versuchsperson unter Labor- und Feldbedingungen erfaßt und ergonomisch beurteilt werden.

Grundlage für die Klassifizierung der Destabilisierungen der menschlichen Homöostase ist ein Beurteilungskonzept für die Ermüdung des Menschen bei vorwiegend nichtkörperlichen Arbeitsinhalten (Haider u. Rohmert, 1976), das Variationen physiologischer und regelungstechnischer Indikatoren (Momentanherzfrequenz, Lidschlußfrequenz, Regelfehler) Ermüdungsgraden zuordnet (Tab. 1).

Meßtechnisch werden dabei die zentralphysiologische Beanspruchung über die Dynamik der Herzschlagfrequenz bzw. deren Variabilität, die willkürlich realisierten Leistungsreserven (motivationale Komponente der Aktiviertheit) über die Lidschlußfrequenz und die Regelleistung über die Regelabweichung beurteilt.

Die Übertragbarkeit von Daten aus simulierten Untersuchungen auf reale Arbeitsbedingungen soll diskutiert und das für simulierte Kraftfahrzeugfahrten entwickelte Beurteilungskonzept validiert werden. Die Ergebnisse sollen in den Kontext der interindividuellen Variationen von Aktivität, Aktiviertheit und Beanspruchung gestellt werden.

## 2. Methodik

### 2.1 Felduntersuchungen

Auf Bundesautobahnen wurden mehrstündige Kraftfahrzeugfahrten durchgeführt, die monotone, mittlerer Verkehrsdichte angepaßte und anregungsreiche Fahrsituationen umfaßten. Die Regelaufgabe bestand im Einhalten eines Sicherheitsabstandes zu einem vorausfahrenden Fahrzeug. Das Meßfahrzeug

**Tabelle 1.** Zuordnung von Ermüdungsgraden zur Beanspruchung, Motivation und Leistung (nach Haider u. Rohmert, 1976)

	Ermüdungsgrade		
	1	2	3
Beanspruchungszunahme	keine	deutlich	hoch
Aktiviertheit	schwankend	steigend	abnehmend
Leistung	schwankend	konstant steigend	abnehmend, Fehlleistungen

war mit automatischem Getriebe ausgestattet um energetische Beanspruchungskomponenten des Fahrers zu minimieren. Die Versuchsperson (männlich, 27 Jahre, Student, normalsichtig, Führerschein seit 8 Jahren, 120000 zurückgelegte km) wurde auch bei den simulierten Kraftfahrzeugführungsaufgaben (Kap. 2.2) eingesetzt.

Ausgehend von einem Beurteilungsansatz informatorischer Arbeit, der zeitvariante Reaktionen des Menschen aus den Bereichen der Aktivität (Leistung), Aktiviertheit (Einsatz von willentlich realisierten Leistungsreserven) und der peripheren und zentralen Beanspruchung mit einbezieht (Haider, 1977), wurden Meßgrößen mit entsprechend gerichteter Indikationswirkung abgeleitet.

Als Beanspruchungsindikatoren wurden die Momentanherzfrequenz (MHF) über die Intervallzeiten der R-Zacken im Elektrokardiogramm, die Herzschlagvariabilität (Rohmert et al., 1973) sowie das Elektromyogramm eines ausgewählten, an der Fahraufgabe beteiligten Muskels (M. peroneus longus) (Laurig, 1974) registriert und ausgewertet. Das Zeitverhalten der Aktiviertheit wurde über die Lidschlußfrequenz (LSF) aus dem Elektrooculogramm und die Aktivität über das Regelverhalten (Abstandsvariation zum vorausfahrenden Fahrzeug) erfaßt.

Die Methodik der Ableitung und Auswertung der Lidschlußfrequenz ist bei Haider u. Rohmert (1976) beschrieben. Die Validität der Lidschlußfrequenz als Indikator für die willentlich realisierten Leistungsreserven ist gegeben über die Kovariation der Dynamik der LSF-Zeitreihen zu subjektiv beurteilten, motivationsspezifischen Skalierungselementen und über die negative Korrelation ( $P > 0,01$ ) der Lidschlußfrequenz zum Tagesgang der physiologischen Leistungsbereitschaft (Haider, 1977).

Das Meßfahrzeug war mit einem Abstands- und Differenzgeschwindigkeitsmeßgerät auf Radarbasis ausgerüstet (Gemeinschaftsentwicklung der Daimler Benz AG und SEL), das die Meßsignale in 20 ms-Intervallen lieferte.

Wegen des diskreten Abstandsignals (Auflösungsschwelle: 5 m) wurde der Regelfehler definiert als zeitbezogene Summe von Abstandsvariationen über mehr als drei Intervallstufen in einer Richtung (Abb. 1). Abstandsänderungen wurden dann als Abweichungen von der Sollwertfunktion gewertet, wenn keine Intervallstufe länger als 10 s belegt war. Damit wurden niederfrequente, geschwindigkeitsabhängige Abstandsänderungen nicht in die Regelfehlererkennung miteinbezogen.

Abbildung 2 zeigt die Meßgrößen, die für die Beurteilung der Aktivität, Aktiviertheit und Beanspruchung abgeleitet wurden.

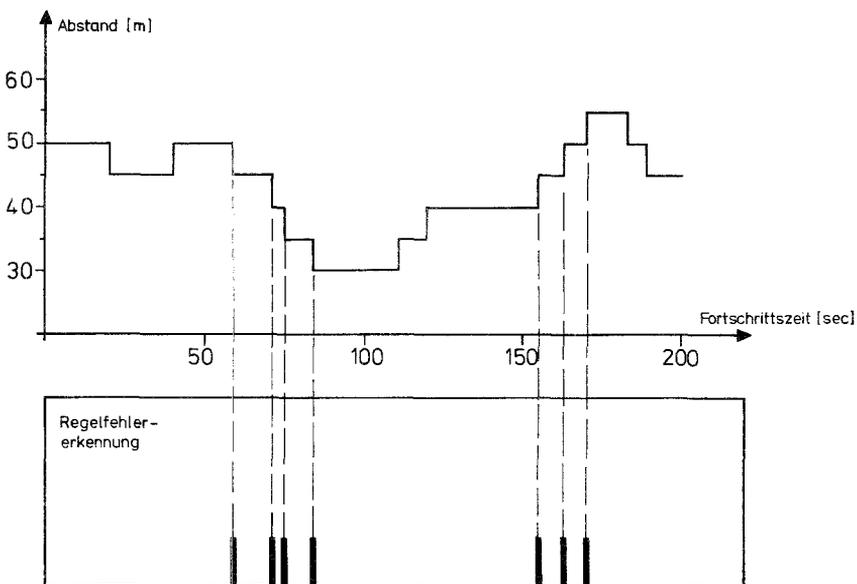
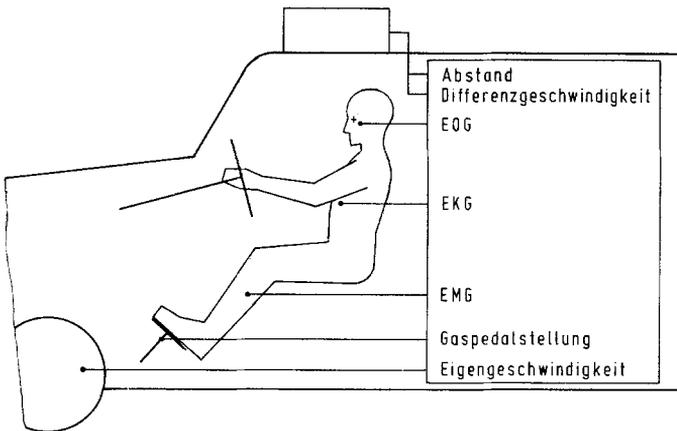


Abb. 1. Ableitung des Regelfehlers aus dem für Feldversuche vorliegenden diskreten Abstandsverlauf



**Abb. 2.** Registrierte Meßgrößen und ihre Ableitungsstellen im Versuchsfahrzeug

Neben den die Meßmethodik bestimmenden Randbedingungen der Rückwirkungsfreiheit, die physiologische Meßansätze determinierte, waren sicherheitstechnische Aspekte, die aus der Interaktion mit anderen Mensch-Kraftfahrzeugsystemen erwachsen, zu beachten. Der Geräteaufbau (Biosignalverstärker, Zeituhr, 8-Kanal-Bandgerät, 8-Strahl Oszillograph) wurde fest mit dem Fahrzeug an Stelle des Beifahrersitzes verankert. Die Bedienung der Meßgeräte wurde von der hinteren Sitzbank aus vorgenommen.

Neben einer dem normalen Verkehrsfluß angepaßten Fahrsituation wurden anregungsreiche (häufiges Beschleunigen und Verzögern des vorausfahrenden Fahrzeugs) und anregungsarme Belastungssituationen (vorausfahrendes Fahrzeug fährt mit konstanter Geschwindigkeit) erfaßt. Die Zeitinvarianz der Sollwertfunktionen wurde ex post mit Spektralanalysen geprüft.

Diese versuchsmethodischen Randbedingungen führten zu Einschränkungen in der Versuchsplannung: Während eine dem normalen Verkehrsfluß angepaßte Belastungssituation zwischen 9.00 und 13.00 Uhr untersucht wurde, mußten wegen der erforderlichen geringen Verkehrsdichte, die unter dem Aspekt der Verkehrssicherheit und der geringen Störeinflüsse auf das Radarsystem durch Fremdfahrzeuge zu fordern war, die Versuche mit geringer Anregung und bei anregungsreicher Fahrsituation in den späten Abendstunden zwischen 21.00 und 2.00 Uhr durchgeführt werden.

Zur *zeitvarianten* Beanspruchungsbeurteilung werden, wegen der die Belastungssituation mitbestimmenden unterschiedlichen Umgebungseinflüsse, die in einer Felduntersuchung nicht vollständig kontrollierbar sind, vor allem die Variationen der physiologischen und regelungstechnischen Meßdaten herangezogen, da ein Absolutvergleich primär die Beanspruchungs- und Leistungsreaktionen auf die unterschiedlichen Belastungssituationen wiedergibt (Rohmert, 1977).

## 2.2 Simulationsuntersuchungen

Mit der Versuchsperson, die auch bei den Feldversuchen eingesetzt wurde, fanden Laborexperimente bei einer simulierten Kraftfahrzeugführung (ebenfalls automatisches Getriebe) statt. Der Simulator (Hartwich, 1971) zeigt der Versuchsperson auf einem Monitor eine auf einem Endlosband maßstabsgetreu (1 : 60) modellierte Autobahn mit einem vorausfahrenden Modellfahrzeug. Über die Bedienelemente Gas, Bremse und Lenkung werden das Endlosband und die die Sichtbedingungen simulierende Fernsehkamera angesteuert. Das vorausfahrende Fahrzeug wird magnetisch geführt und ist im Geschwindigkeitsverhalten ansteuerbar.

Bei gleicher Aufgabenstellung wie bei den Feldversuchen, jedoch bei kontrolliert konstanten Umgebungsbedingungen wurden drei Belastungssituationen, definiert über die Grenzfrequenz des pseudostochastischen Signals, die die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs bestimmt, experimen-

tell untersucht. Die Grenzfrequenz des Rauschsignals wurde in den Stufen 0 Hz; 0,15 Hz; 0,30 Hz variiert und ein Bezug zu den im Feld registrierten Belastungssituationen über eine ex post-Spektralanalyse des Beschleunigungsverhaltens der Meßfahrzeuge hergestellt.

Für die Registrierung und Auswertung der Beanspruchung und der Aktiviertheit wurden die gleichen Verfahren wie bei den Felduntersuchungen angewandt. Die Regelleistung (Aktivität) des Mensch-Kraftfahrzeug-Systems wurde wegen der unter Simulationsbedingungen meßtechnisch zugänglichen analogen Abstandsverläufe durch Filterung des Abstandssignals (Hochpaß: 0,002 Hz) beurteilt und zeitbezogen aufintegriert. Wie bei den Feldversuchen wurden damit geschwindigkeitsadaptive Abstandsvariationen nicht als Regelfehler bewertet.

### 3. Besprechung der Ergebnisse

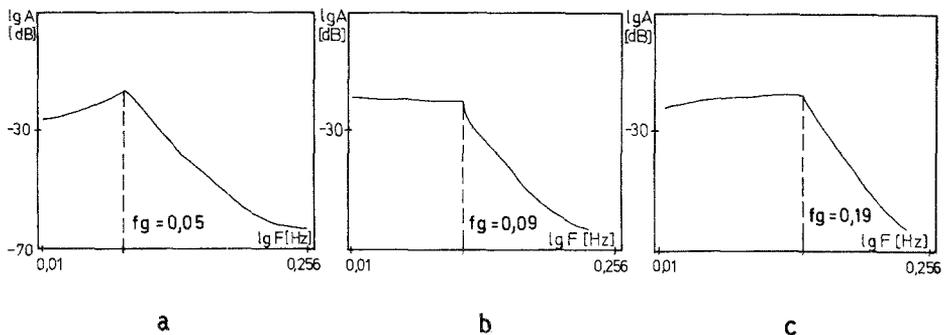
#### 3.1 Belastungsanalyse

Da die im Rahmen der Felduntersuchung durchgeführten Variationen der Aufgabenschwierigkeit nur verbal und auf Ordinalskalenniveau definiert werden konnten, muß zur Einordnung der Felduntersuchungen in das Schwierigkeitsspektrum und zum Vergleich der Ergebnisse unter simulierten und realen Bedingungen eine ex post-Belastungsanalyse erfolgen.

Näherungsweise werden dazu die Grenzfrequenzen des Beschleunigungsverhaltens der Meßfahrzeuge in einer Spektralanalyse ermittelt. Abbildung 3 zeigt exemplarische Einzelanalysen der Beschleunigung für die untersuchten Belastungsstufen der Feldversuche.

Insgesamt wurden für jede Belastungsstufe sechs Analysen je 400 s durchgeführt und gemittelt: Tabelle 2 zeigt im Vergleich zu den Laborexperimenten die ermittelten Grenzfrequenzen.

Die anregungsreiche Fahrsituation (Bandbreiten: Labor 0,28; Feld 0,19 Hz) weist etwa die doppelte Grenzfrequenz der dem Verkehrsfluß angepaßten Beschleunigungen (Bandbreiten: Labor 0,11 Hz; Feld 0,096 Hz) auf. Die Rangreihen der Grenzfrequenzen innerhalb der Feld- bzw. Laboruntersuchungen und auch mit den



**Abb. 3.** Spektralanalyse der Beschleunigungen des Meßfahrzeuges in drei Belastungsstufen. Die Beschleunigungsamplitude  $A$  und die Frequenz sind logarithmisch aufgetragen. **a** annähernd konstante Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs, **b** normaler Verkehrsfluß, **c** anregungsreiche Fahrsituation

**Tabelle 2.** Vergleich der Belastungssituationen der Feld- und Laboruntersuchungen über die Grenzfrequenz der Beschleunigungen

Labor		Feld
Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs, Grenzfrequenz (Hz)	Beschleunigung des Meßfahrzeugs, Grenzfrequenz (Hz)	Beschleunigung des Meßfahrzeugs, Grenzfrequenz (Hz)
0,0	0,01	0,056
0,15	0,11	0,096
0,30	0,28	0,190

Grenzfrequenzen der Sollwertfunktionen der Laborexperimente stimmen überein. Für hohe Beschleunigungsfrequenzen wird die im Feld gemessene Grenzfrequenz kleiner, für niedrige Beschleunigungsfrequenzen größer als die entsprechenden Werte der Laboruntersuchungen.

Interpretierend kann dazu gesagt werden, daß eine langfristig konstante Geschwindigkeit zwar im Simulator exakt realisiert werden kann, bei Felduntersuchungen aber bereits die Eigenbewegung (Tustin, 1944; Hartwich, 1971) eine von Null verschiedene Grenzfrequenz bewirkt.

Eine Analyse der Eigengeschwindigkeit zeigt, daß die im Mittel über die Versuchszeit eingehaltene Geschwindigkeit (95 km/h bei 0,056 Hz; 97 km/h bei 0,096 Hz; 110 km/h bei 0,19 Hz) sich nur wenig von der bei den Laboruntersuchungen vorgegebenen (100 km/h) unterscheidet.

### 3.2 Beurteilung der Feldversuche

Die Feldversuche werden über die theoretisch abgeleitete (Schmidtke, 1965; Haider u. Rohmert, 1976) und in Laboruntersuchungen validierte Beurteilungsmethodik, basierend auf den Zeitreihen der Indikatoren für die zentralphysiologische Beanspruchung (Momentanherzfrequenz, Herzfrequenzvariabilität), die Aktiviertheit (Lid-schlußfrequenz) und die Aktivität (Regelleistung) des Menschen klassifiziert.

Die Meßphasen der Einzeluntersuchungen (jeweils 170 min) werden dazu in drei zeitgleiche Abschnitte unterteilt und über eine Zuordnung von Ermüdungsgraden (Haider, 1977) tätigkeitsdauerbezogen eingestuft. Die Angaben zur statistischen Absicherung der Variation von Zeitreihen über die Rangkorrelation beziehen sich auf ein Signifikanzniveau von 5%.

Eine zunehmende peripherphysiologische Beanspruchung des *M. peroneus longus* am rechten Bein (Gas- und Bremspedalbetätigungen) konnte, wie schon bei Laboruntersuchungen gezeigt worden war (Haider u. Rohmert, 1976), nicht abgesichert werden.

### 3.2.1 Belastungssituation: normaler Verkehrsfluß (Grenzfrequenz der Beschleunigung 0,096 Hz)

Nach einer Anpassungsphase, die vor allem durch das Abklingen emotionaler Beanspruchungen nach einem Initialanstieg der Herzschlagfrequenz bei konstanter Regelleistung und Aktiviertheit bestimmt ist (Ermüdungsgrad 1), setzt zeitversetzt zu einem signifikanten kontinuierlichen Anstieg der Aktiviertheit (Lidschlußfrequenzanstieg von 25 auf 35 Lidschläge/Minute) eine zunehmende mentale Beanspruchung (kein statistisch signifikanter Anstieg der Herzfrequenzvariabilität, obwohl die Momentanherzfrequenz signifikant fällt) ein (Ermüdungsgrad 2). Im letzten Versuchsdrittel signalisiert eine signifikant ansteigende Herzschlagfrequenz bei weiterhin kontinuierlich und signifikant zunehmender Aktiviertheit (maximal 48 Lidschlüsse/Minute) eine zentralphysiologische Beanspruchungserhöhung (Ermüdungsgrad 2).

### 3.2.2 Anregungsreiche Belastungssituation (Grenzfrequenz der Beschleunigung 0,19 Hz)

Die anregungsreiche Belastungssituation ist gekennzeichnet durch eine von Fahrbeginn an zunehmende mentale Beanspruchung (signifikant abnehmende Herzfrequenzvariabilität). In den beiden ersten Versuchsabschnitten steigt die Lidschlußfrequenz monoton und signifikant an (von 12 auf 35 Lidschlüsse/Minute). Der Regelfehler kann bei zunehmender Aktiviertheit zunächst auf niedrigem Niveau gehalten werden (Ermüdungsgrad 2 für beide Abschnitte).

Die langfristige Beanspruchungszunahme erzwingt schließlich einen Rückgang der Aktiviertheit (signifikant negativer Trend der Lidschlußfrequenz in den letzten 40 Versuchsminuten). Der Regelfehler liegt im letzten Versuchsdrittel signifikant höher (Paardifferenzentest nach Wilcoxon) als im ersten Versuchsdrittel (Ermüdungsgrad 3).

Abbildung 4 zeigt exemplarisch die Zeitreihen der physiologischen Meßgrößen, die zur Beurteilung herangezogen wurden.

### 3.2.3 Anregungsarme Belastungssituation (Grenzfrequenz der Beschleunigung 0,056 Hz)

Nach einer Anpassungsphase (Abnahme der Herzschlagfrequenz) bei konstanter hoher Regelqualität und nichtsignifikant steigender Aktiviertheit (Ermüdungsgrad 1) nimmt die mentale Beanspruchung (Indikator: Herzfrequenzvariabilität) im zweiten Versuchsdrittel signifikant zu (Ermüdungsgrad 2). Im letzten Versuchsdrittel wird die Aktiviertheit (willentliche Realisierung von Leistungsreserven), wiederum gekoppelt mit zunehmender Beanspruchung (Indikator: Herzschlagfrequenz), signifikant zurückgenommen. Der Regelfehler ist bei großer Streuweite (Aufmerksamkeitschwankungen) hoch (Ermüdungsgrad 3).

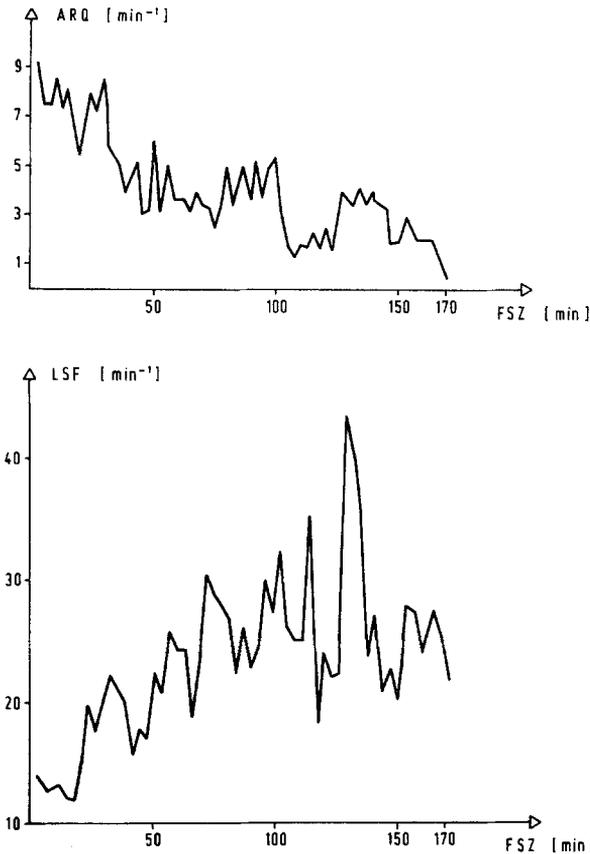


Abb. 4. Arrhythmiequotient (ARQ) und Lidschlußfrequenz (LSF) über der Fortschrittszeit (FSZ) in einem Feldversuch (anregungsreiche Fahrt, Autobahn, VP : FO)

### 3.3 Vergleich mit Ergebnissen aus simulierten Kraftfahrzeugfahrten

Die auf Ordinalskalenniveau definierten Ermüdungsgrade können statistisch nur im Sinne von Häufigkeiten ausgewertet werden. Kontingenztafeln (Campbell, 1971) bieten die Möglichkeit der Prüfung der Unabhängigkeit mehrerer Merkmale. Im Rahmen einer Mehrfeldanalyse wurden wegen der Zeitabhängigkeit der klassifizierten Aktivitäts-, Aktiviertheits- und Beanspruchungsvorgänge die Merkmale Tätigkeitszeit und Ermüdungsgrade einander zugeordnet.

Es ist die Eigenart verteilungsfreier statistischer Methoden, daß die Grundvoraussetzungen statistischer Tests weit weniger spezifiziert sind, als die der klassischen Methoden. Häufigkeitstests sind unter der einzigen Bedingung anwendbar, daß die Merkmale zumindest alternativ abstufbar sind, als Annahme wird die gleiche Verteilungsform für die zugrundeliegenden Populationen vorausgesetzt (Lienert, 1962). Die gestellte Bedingung ist für die vorliegenden Daten erfüllt, die Annahme erübrigt sich bei ausschließlich intraindividuellem Auswertung.

**Tabelle 3.** Summenkontingenztafel für die Labor- und Felduntersuchungen

Arbeitsdauer (Abschnitte)	Ermüdungsgrade		
	1	2	3
1	5	1	0
2	2	4	0
3	0	4	2

**Tabelle 4.** Kontingenztafel für die Felduntersuchungen

Arbeitsdauer (Abschnitte)	Ermüdungsgrade		
	1	2	3
1	2	1	0
2	0	3	0
3	0	1	2

**Tabelle 5.** Kontingenztafel für die Laboruntersuchungen

Arbeitsdauer (Abschnitte)	Ermüdungsgrade		
	1	2	3
1	3	0	0
2	2	1	0
3	0	3	0

Bei gleicher Auswertungs- und Skalierungsmethodik wurden zunächst die Merkmale der Summenkontingenztafel für Labor- und Felduntersuchungen auf Unabhängigkeit geprüft. Da nicht alle Merkmalsfelder die für den  $\chi^2$ -Test vorauszusetzenden Erwartungshäufigkeiten erbrachten, was vor allem auf die kleine Stichprobe  $n = 18$  zurückzuführen ist, wurde die Informationsstatistik (Kullback, 1959) angewendet. Unbesetzte Felder der Kontingenztafel (Tab. 3) werden in der Informationsstatistik  $2\hat{I}$  durch die von Ku (1963) vorgeschlagene Korrektur berücksichtigt.

Die Merkmale der Kontingenztafel wurden auf Unabhängigkeit geprüft. Die Unabhängigkeit der Merkmale Arbeitsdauer und Ermüdungsgrade muß auf dem 5%-Signifikanzniveau abgelehnt werden ( $2\hat{I}_{\text{Korr}} = 10,8 > 9,49 = \chi^2_{4; 0,05}$ ).

Damit ist gezeigt, daß der Grad der Ermüdung für die untersuchte Stichprobe in den zeitlich aufeinanderfolgenden Versuchsabschnitten ansteigt.

Die  $2\hat{I}$ -Statistik liefert eine Approximation für den  $\chi^2$ -Wert, damit kann auch die Straffheit des Zusammenhanges, ausgedrückt über den Pearsonschen Kontingenzkoeffizient ( $CC_{\text{Korr}}$ ) geschätzt werden.  $CC_{\text{Korr}}$  ergibt sich zu 0,88.

Ein intraindividueller Vergleich der Felduntersuchung mit der simulierten Kraftfahrzeugführung kann über die spezifischen Kontingenztafeln (Tab. 4 u. 5) geführt werden.

Es ergibt sich für die simulierten Arbeitssituationen bei signifikanter Abhängigkeit der geprüften Merkmale Arbeitsdauer und Ermüdungsgrad ( $2\hat{I}_{\text{Korr}} = 6,55 > 5,99 = \chi^2_{2; 0,05}$ ) eine Nichtbesetzung der Häufigkeitsfelder des dritten Ermüdungsgrades.

Ein Vergleich der Zeitreihen der Indikatoren für Aktivität, Aktiviertheit und Beanspruchung für die Belastungsstufen macht deutlich, daß der 3. Ermüdungsgrad bei den simulierten Kraftfahrzeugfahrten insbesondere deshalb nicht erreicht wird, weil in der anregungsreichen Fahrsituation zwar eine Rücknahme der willentlich realisierten Leistungsreserven erfolgt, eine signifikante Beanspruchungszunahme jedoch nicht nachgewiesen werden konnte.

Die in dreiwöchigem Abstand zu den Feldversuchen durchgeführten Laboruntersuchungen machen der Versuchsperson bei sonst gleicher Methodik das Fehlen von Sicherheitsrisiken offensichtlich bewußt, so daß eine Beanspruchungsdestabilisierung nicht eintritt. Im interindividuellen Vergleich zu der gleichen (simulierten) Tätigkeit (Haider u. Rohmert, 1976) prägt sich bei Feld- und Laborbedingungen bei mittlerer Belastung (Grenzfrequenz 0,11 Hz) der gleiche Beanspruchungsverlauf von der Anpassungsphase (Beanspruchungsreduktion) bis zur Fehlpassungsphase (Beanspruchungszunahme) bei gekoppelten Aktivitäts-/Aktiviertheitsverläufen aus. Die Verdopplung der Grenzfrequenz der Anregungsfunktion führt für beide Untersuchungsblöcke zu regressiven Phasen der Aktiviertheit in der zweiten Versuchshälfte (Abnahmen der Lidschlußfrequenz), die mit Beanspruchungserhöhungen gekoppelt sind.

Die in der Rangreihe der Belastungssituationen als geringste Aufgabenschwierigkeit zu skalierende Belastung (Beschleunigungsfrequenz Labor: 0,01 Hz; Feld: 0,056 Hz) weist analog zur relativ größten, aus dem Beschleunigungsverhalten definierten Anregungsdifferenz, ein unterschiedliches zeitvariantes Verhalten auf:

Für den Feldversuch nimmt die Aktiviertheit im letzten Versuchsdrittel ab, bei den Laborversuchen war ein kontinuierliches Ansteigen der willkürlich realisierten Leistungsreserven als typisch klassifiziert worden. Für die anregungsarme Belastungssituation machen sich somit die unter Feld- und Laborbedingungen unterschiedlichen Belastungshöhen in verschieden starken Beanspruchungsrückkopplungen auf das Aktiviertheitsverhalten bemerkbar.

#### 4. Diskussion und Folgerungen

Zunächst wurde für das in Laboruntersuchungen entwickelte Meßkonzept einer Aktivitäts-, Aktiviertheits- und Beanspruchungserfassung die vollständige Übertragbarkeit auf reale Arbeitssysteme nachgewiesen. Unter den strengen Anforderungen, die aus einem nichtstationären Meßplatz sowie der Interaktion mit anderen Arbeitssystemen und der engen Ankopplung an die Arbeitsumgebung erwachsen, war eine Registrierung sowohl physiologischer Indikatoren der Homöostase als auch regelungstechnischer Stabilitätskriterien möglich.

Eine ergonomische Beurteilung des zeitvarianten menschlichen Verhaltens sowohl im simulierten als auch im realen Arbeitssystem mit Hilfe der in Laborexperimenten entwickelten Systematik zur Klassifizierung von Ermüdungsgraden wurde durchgeführt und eine statistisch signifikante Abhängigkeit der Merkmale Ermüdungsgrad und Arbeitsdauer nachgewiesen. Die Methode der Merkmalsklassifizie-

rung in Mehrfeldtafeln erweist sich geeignet zur Beschreibung parallel ablaufender zeitvarianter Prozesse im Menschen: Neben einer übersichtlichen ökonomischen Darstellung, die eine Vermittelbarkeit wesentlich erleichtert, kann die Strenge der Kovarianz zwischen den untersuchten Merkmalen (hier: Ermüdungsgrad und Arbeitsdauer) bei genügend großer Stichprobe sowohl belastungsabhängig als auch auf den untersuchungsmethodischen Block (Feld, Labor) bezogen berechnet und verglichen werden. Während für die Entwicklung von Meßmethoden und Beurteilungsansätzen für Arbeitssysteme eine labororientierte Arbeitsweise wegen der Möglichkeit des Kontrollierens bzw. Ausschaltens von Störgrößen auf das Untersuchungsobjekt empfohlen werden kann, zeigt die Überprüfung der Ergebnisse in Feldstudien, daß sich die Ausprägung der untersuchten Merkmale bedingt durch situative Belastungskomponenten von den simulierten Bedingungen typisch unterscheiden kann.

Für die untersuchte Tätigkeit, der Kraftfahrzeugführung auf Bundesautobahnen, zeigte sich eine im Vergleich zu simulierten Fahrbedingungen erhöhte Beanspruchung bei anregungsreicher Fahrsituation, die auf die latente Gefahrensituation zurückgeführt wird.

Somit kann die Simulationstechnik die Absicherung von Methoden und die trendmäßige Prognose von Ermüdungsverläufen liefern; bei komplexen Arbeitssystemen mit interaktiv an die Umgebung und an andere Arbeitssysteme gekoppelten Prozessen der Aktivität und Aktiviertheit des Menschen ist eine Feldstudie jedoch notwendiger Bestandteil einer Validierung eines Beurteilungsverfahrens, um die Stabilität des Gesamtsystems und die Erträglichkeit für den Menschen bewerten zu können.

## Literatur

- Brenken, G.: Der Weg zum Sicherheitsautomobil. ATZ **73**, 172 (1971)
- Campbell, R. C.: Statistische Methoden für Biologie und Medizin. Stuttgart: Thieme 1971
- Haider, E.: Beurteilung von Belastung und zeitvarianter Beanspruchung des Menschen bei kompensatorischen Regeltätigkeiten: Simulationen – Feldstudien – Modelle. Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 17, Bd. 5. Düsseldorf: VDI 1977
- Haider, E., Rohmert, W.: Untersuchungen zur Lidschlußfrequenz bei vierstündiger simulierter Kraftfahrzeugfahrt. Europ. J. appl. Physiol. **35**, 137–147 (1976)
- Hartwich, E.: Längsdynamik und Folgebewegung des Straßenfahrzeugs und ihr Einfluß auf das Verhalten der Fahrzeugschlange. Dissertation, TH. Darmstadt 1971
- Ku, H. H.: A note on contingency tables involving zero frequencies and the  $2 \times 2$  test. Technometrics **5**, 398–400 (1963)
- Kullback, S.: Information theory and statistics. New York: Wiley 1959
- Laurig, W.: Beurteilung einseitig dynamischer Muskelarbeit. In: Schriftenreihe „Arbeitswissenschaft und Praxis“. Berlin-Köln-Frankfurt: Beuth-Vertrieb 1974
- Lienert, G. A.: Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik. Meisenheim am Glan: Hain 1962
- Rohmert, W., Laurig, W., Philipp, U., Luczak, H.: Heart rate variability and work-load measurement. Ergonomics **16**, 33–44 (1973)
- Rohmert, W.: Arbeitswissenschaft I – Umdruck zur Vorlesung. Darmstadt 1977
- Sachs, L.: Angewandte Statistik. Berlin-Heidelberg-New York: Springer 1974
- Schmidtke, H.: Die Ermüdung. Bern: Huber 1965
- Tustin, A.: An investigation of the operators response in manual control of a power driven gun. C.S. Memorandum No. 169. Sheffield, England: Metropolitan-Vickers Electrical 1944