

**Modellgestützte Fehlererkennung mit Neuronalen Netzen -  
Überwachung von Radaufhängungen und Diesel-Einspritzanlagen**

Vom Fachbereich 19  
der Technischen Hochschule Darmstadt  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von  
**Dipl.-Ing. Steffen Leonhardt**  
aus Frankfurt am Main

Referent : Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. R. Isermann  
Korreferent : Prof. Dr.-Ing. G. Hohenberg

Tag der Einreichung : 03. Feb. 1995  
Tag der mündlichen Prüfung : 10. Juli 1995



---

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1990 - 1994 am Institut für Regelungstechnik, Fachgebiet Regelsystemtechnik und Prozeßautomatisierung, der TH Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. R. Isermann für die Anregung zu dieser Arbeit und seine Unterstützung und stetige Förderung bei der Durchführung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Hohenberg danke ich für das der Arbeit entgegengebrachte Interesse und für die Übernahme des Korreferates.

Das Arbeitsklima am Institut für Regelungstechnik war sehr angenehm. Allen jetzigen und ehemaligen Kollegen, insbesondere der Kraftfahrzeug- und Motoren-Forschungsgruppe, sei an dieser Stelle für die effektive und unkomplizierte Zusammenarbeit gedankt.

Der DFG-Sonderforschungsbereich 241 "Integrierte Mechanisch-Elektronische Systeme" (IMES) bot eine fruchtbare Plattform zum wissenschaftlichen Austausch auch über die Institutsgrenzen. Speziell bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Klaus-Jürgen Kurr, Herrn Dipl. Ing. Reinhold Dold und Herrn Dr.-Ing. Walter Mischo.

Erwähnen möchte ich ferner die gute Zusammenarbeit innerhalb der Transputeranwender-Gruppe an der TH Darmstadt, im einzelnen mit Herrn Dipl. Ing. Claus Meder und Herrn Dr.-Ing. Stefan Vey vom Institut für Datentechnik und mit Herrn Dr. rer. nat. Ewald Schmitz und Herrn Dipl. Phys. Andreas Billo vom Institut für angewandte Physik.

Besonders wichtig war für mich die Mitarbeit in der Lehre. Die Interaktion mit Studenten bot mir die Gelegenheit, komplexe Sachverhalte zu erklären und frühzeitig didaktisch aufzubereiten. Viele der angefallenen Teilaufgaben dieses Projektes wurden von ihnen implementiert und praktisch erprobt. Ein Amerikaner würde an dieser Stelle einflechten "*with them there was more light ...*" - leider kenne ich keine ähnlich prägnante Übersetzung.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Verzeichnis der wichtigsten Symbole und Abkürzungen .....</b>	<b>VII</b>
<b>1. Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Überwachung und Diagnose dynamischer Systeme .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. Einführung .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2. Methoden der Fehlererkennung mit analytischen Verfahren .....</b>	<b>9</b>
2.2.1 Datenerfassung und -verarbeitung .....	9
2.2.2 Extraktion von Merkmalen.....	9
2.2.3 Generierung von Symptomen .....	16
<b>2.3. Methoden der Fehlerdiagnose .....</b>	<b>17</b>
2.3.1. Verfahren mit expliziter Wissensbasis .....	17
2.3.2. Verfahren mit impliziter Wissensbasis .....	18
<b>2.4. Zusammenfassung .....</b>	<b>20</b>
<b>3. Einführung in die Theorie neuronaler Netze .....</b>	<b>21</b>
<b>3.1. Historische Entwicklung .....</b>	<b>21</b>
<b>3.2. Typisierung für neuronale Netze .....</b>	<b>25</b>
3.2.1 Elementare Verarbeitungseinheiten .....	25
3.2.2 Netz-Topologien .....	27
3.2.3 Lernregeln .....	32
<b>3.3. Typische Eigenschaften neuronaler Netze .....</b>	<b>42</b>
3.3.1 Kontinuierliche Abbildungen .....	42
3.3.2 Binäre Abbildungen .....	44
3.3.3 Boole'sche Funktionen .....	45
<b>3.4. Zusammenfassung .....</b>	<b>46</b>
<b>4. Diagnose von KFZ-Radaufhängungen .....</b>	<b>47</b>
<b>4.1. Einführung .....</b>	<b>47</b>
<b>4.2. Modellbildung der Vertikaldynamik .....</b>	<b>49</b>
<b>4.3. Extraktion von Merkmalen.....</b>	<b>51</b>
4.3.1. Zusammenhang zwischen phys. Koeffizienten und diskreten Parametern .....	51
4.3.2. Simulation von Parameteränderungen .....	53
4.3.3. Messungen am Prüfstand .....	57
4.3.4. Sensitivitätsanalyse .....	62
<b>4.4. Überwachung und Fehlerdiagnose .....</b>	<b>64</b>
4.4.1. Approximationsergebnisse .....	64
4.4.2. Klassifikationsergebnisse .....	67
<b>4.5. Zusammenfassung .....</b>	<b>71</b>

---

<b>5. Überwachung der Einspritzanlage von Dieselmotoren</b> .....	72
<b>5.1. Einführung</b> .....	72
<b>5.2. Modellbildung bei Verbrennungsmotoren</b> .....	75
5.2.1. Empirische Modelle für das dynamische Verhalten .....	75
5.2.2. Physikalische Modellbildung des Dieselmotors .....	83
<b>5.3. Zylinderdruck-Analyse</b> .....	94
5.3.1. Stand der Technik .....	95
5.3.2. Differenzdruck-Analyse .....	97
<b>5.4. Extraktion von Drucksignal-Merkmalen</b> .....	100
5.4.1. Datenreduktion durch Merkmalbildung .....	100
5.4.2. Sensitivitätsanalyse .....	101
<b>5.5. Fehlererkennung an der Einspritzpumpe</b> .....	114
5.5.1. Stationärer Motorbetrieb .....	115
5.5.2. Dynamischer Motorbetrieb .....	118
<b>5.6. Zusammenfassung</b> .....	121
<b>6. Echtzeit-Betrieb im Kraftfahrzeug</b> .....	123
<b>6.1. Das Kraftfahrzeug als Multiprozessor-System</b> .....	123
<b>6.2. Zeitgewinn durch parallele Datenverarbeitung</b> .....	124
6.2.1. Theoretische Grundlagen .....	124
6.2.2. Konzepte zur Kopplung von Prozessoren .....	127
<b>6.3. Echtzeit-Einsatz von Transputern</b> .....	128
6.3.1. Der Transputer als 32 bit-Mikrocontroller .....	128
6.3.2. Anwendungsergebnisse .....	131
<b>6.4. Zusammenfassung</b> .....	134
<b>7. Ergebnis und Ausblick</b> .....	136
<b>Anhang</b> .....	140
<b>Literatur</b> .....	167