

Einführung und Übersicht

Gliederung

- Systembetrachtungen
- Aktoren/Elektromotoren
- Ansteuerung und Leistungselektronik
- Entwicklungswerkzeuge
- Anwendungsbeispiele Kfz-Elektronik

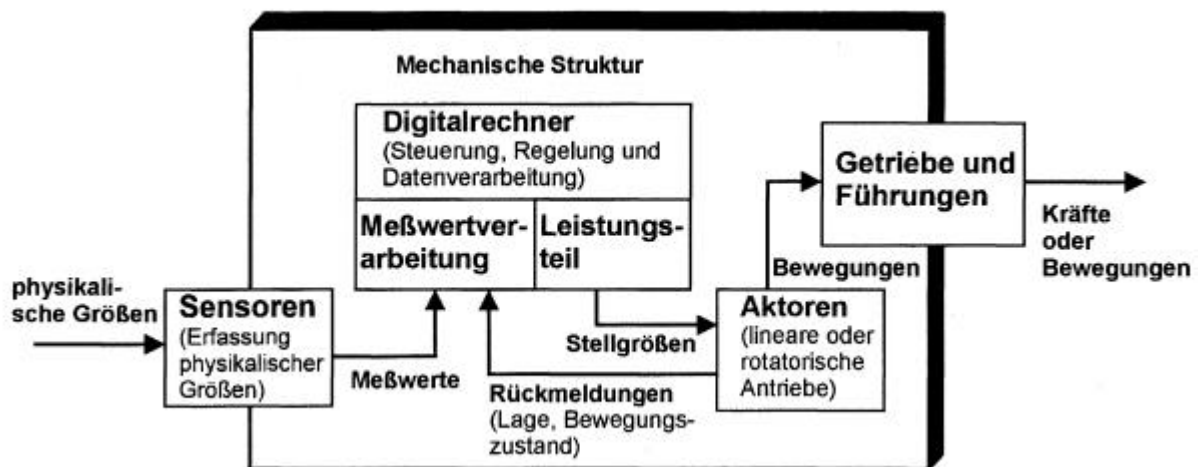


Bild 1: Aufbau mechatronischer Systeme.
(Quelle: W. Roddeck: Einführung in die Mechatronik. Teubner 1997).

Systembetrachtungen

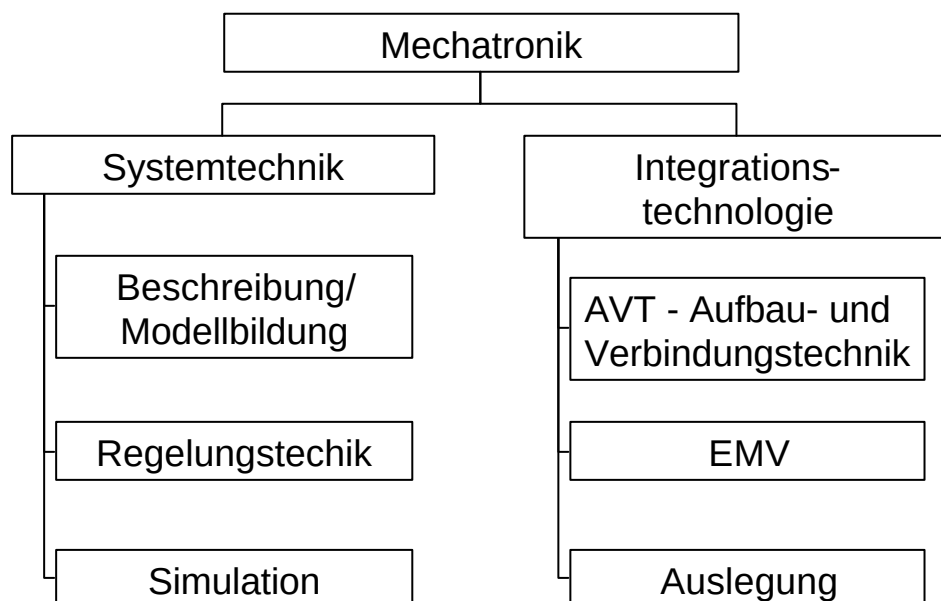


Bild 2: Arbeitsgebiete der Mechatronik.

Äquivalenz von elektrischen und mechanischen Schwingungen

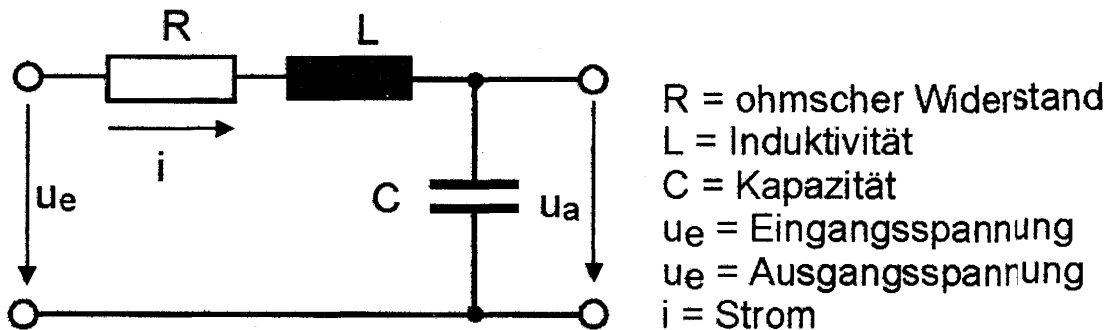
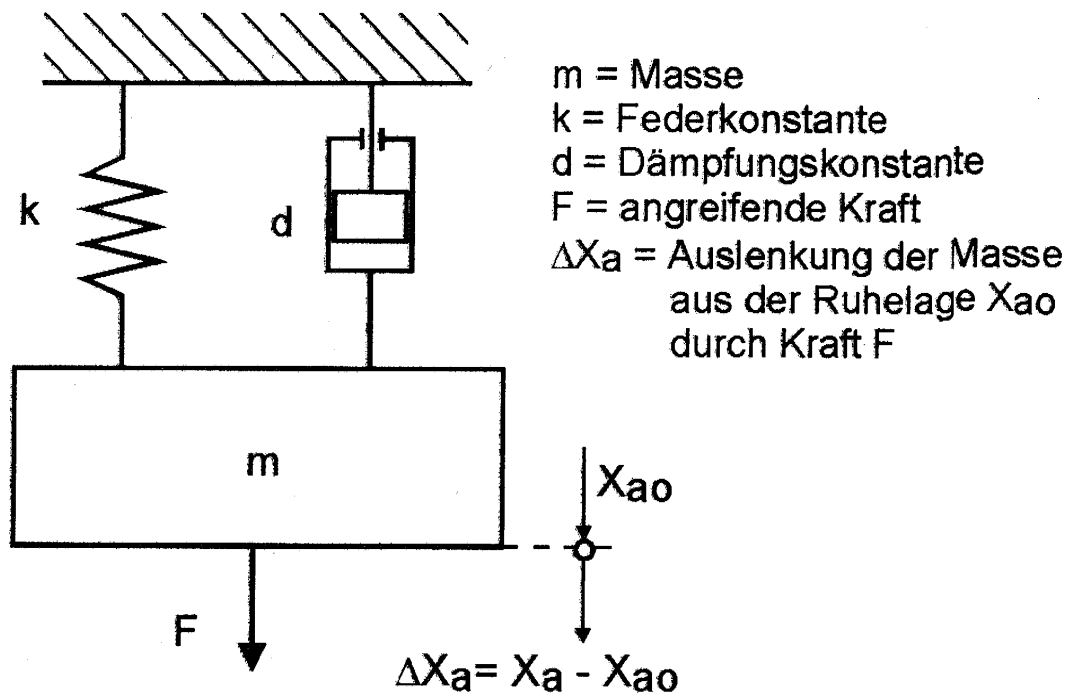


Bild 3: Mechanischer und elektrischer Schwingkreis

Mechanisches System	Elektrisches System
Masse m	Induktivität L
Dämpfungskonstante d	Ohm'scher Widerstand R
Nachgiebigkeit $c = \frac{1}{k}$	Kapazität C

Tabelle 1: Äquivalenz mechanischer und elektronischer Größen in schwingenden Systemen.

Mechanisches System	Elektronisches System
Differentialgleichung	
$m \cdot \ddot{x}_a(t) + d \cdot \dot{x}_a(t) + k \cdot x_a(t) = F(t)$	$LC \cdot \ddot{u}_a(t) + RC \cdot \dot{u}_a(t) + u_a(t) = u_e(t)$
Eigenfrequenz	
$f = 2p \cdot \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{d}{2 \cdot m}\right)^2}$	$f = 2p \cdot \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2 \cdot L}\right)^2}$
Dämpfungsmaß	
$D = \frac{d}{2\sqrt{mk}}$	$D = \frac{R}{2\sqrt{L/C}}$
Übertragungsfunktion	
$G(s) = \frac{X_a(s)}{F(s)} = \frac{1}{\frac{m}{k} \cdot s^2 + \frac{d}{k} \cdot s + 1}$	$G(s) = \frac{U_a(s)}{U_e(s)} = \frac{1}{LC \cdot s^2 + RC \cdot s + 1}$

Tabelle 2: Äquivalenz von Systemeigenschaften in schwingenden mechanischen und elektrischen Systemen.

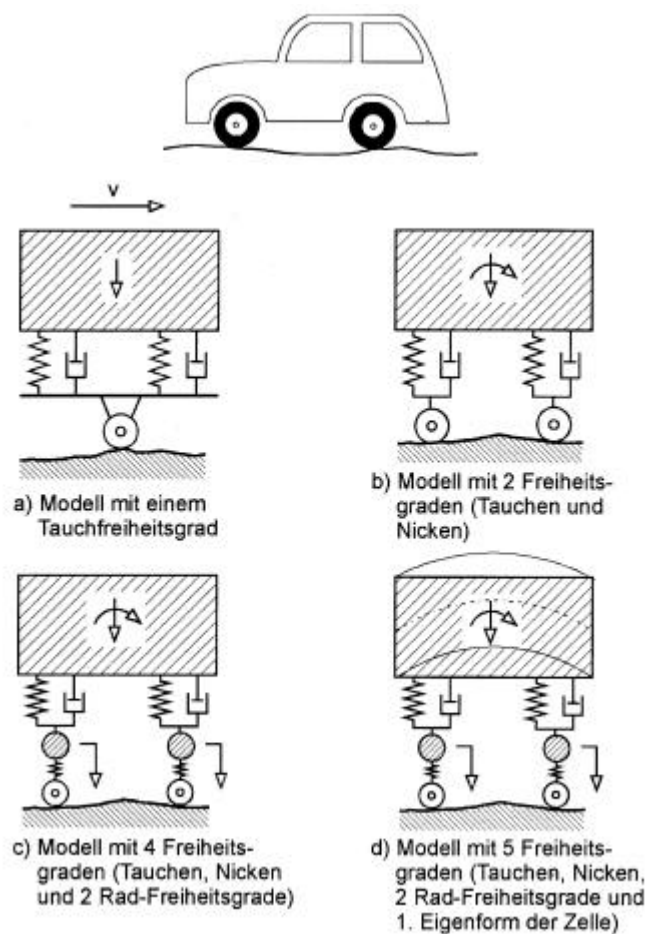


Bild 4: Mechanische Modelle für das dynamische Systemverhalten eines Pkw mit unterschiedlich vielen Freiheitsgraden. (Quelle: Roddeck).

Aktoren/Elektromotoren

Gleichstrommotoren

- mechanisch kommutiert
- elektronisch kommutiert

Drehfeldmotoren

- Synchronmotoren
- Asynchronmotoren

Schrittmotoren

Linearmotoren

Ansteuerung von Elektromotoren und Leistungselektronik

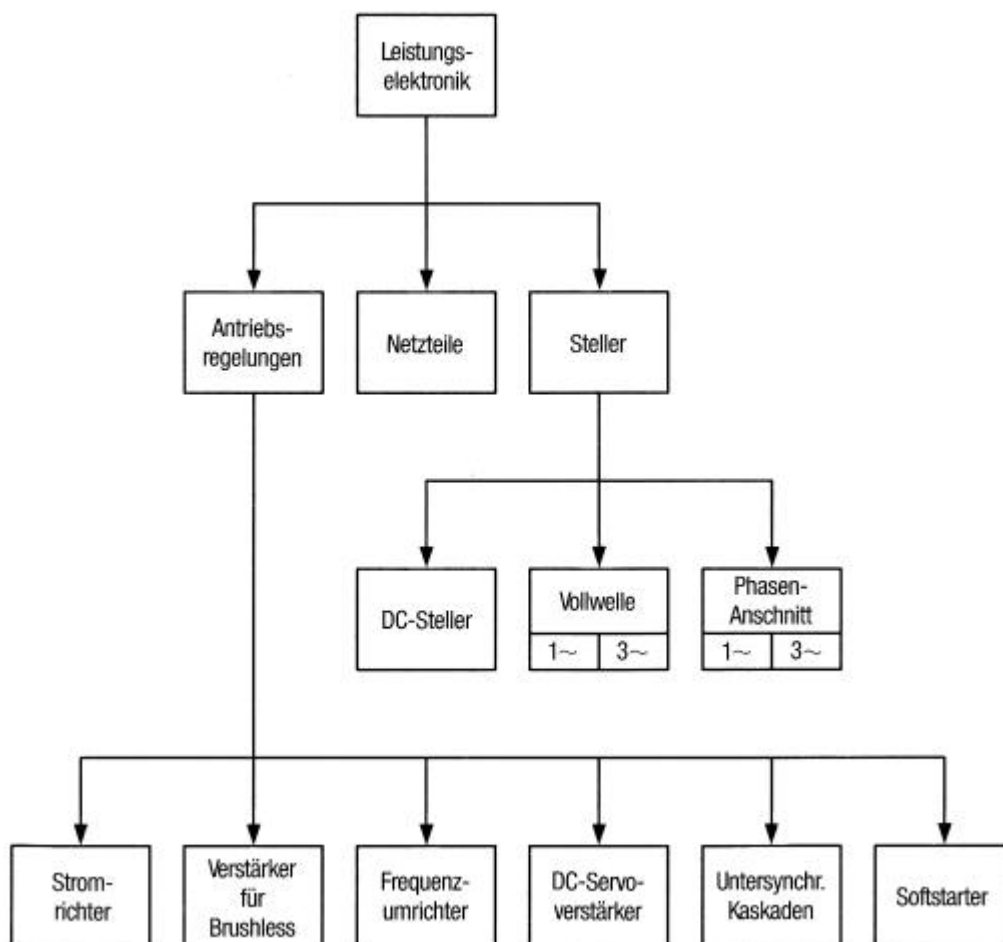


Bild 5: Übersicht über die Leistungselektronik zur Ansteuerung von Elektromotoren.

Was wird bei Antriebssystemen mit Elektromotoren geregelt?

- Position, Lage
- Geschwindigkeit, Drehzahl
- Beschleunigung
- Ruck

Weitere geregelte Größen:

- Kräfte, Drehmomente
- Ströme
- Temperatur

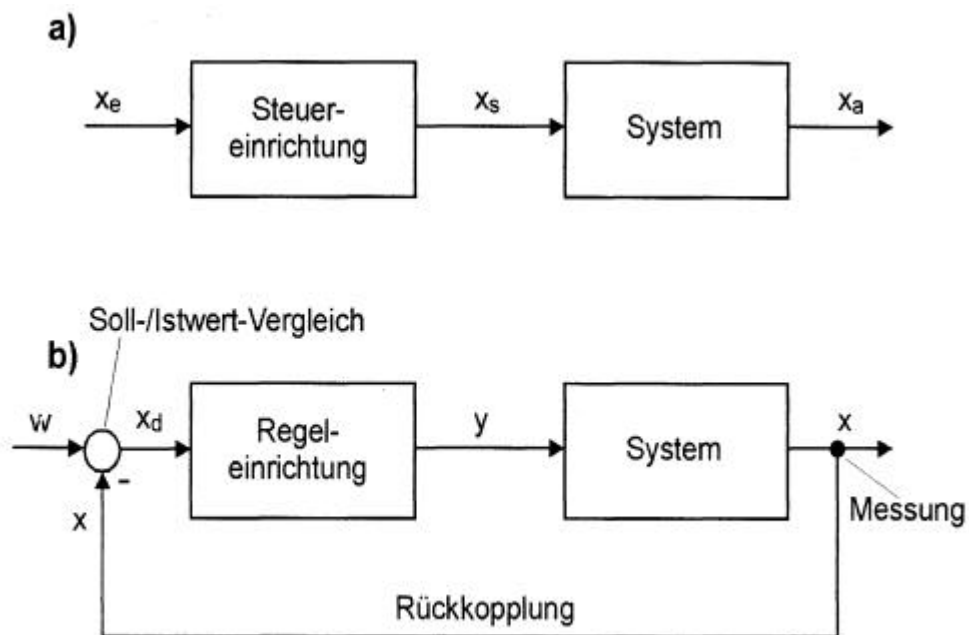


Bild 6: Wirkprinzipien von Steuerung (a) und Regelung (b).

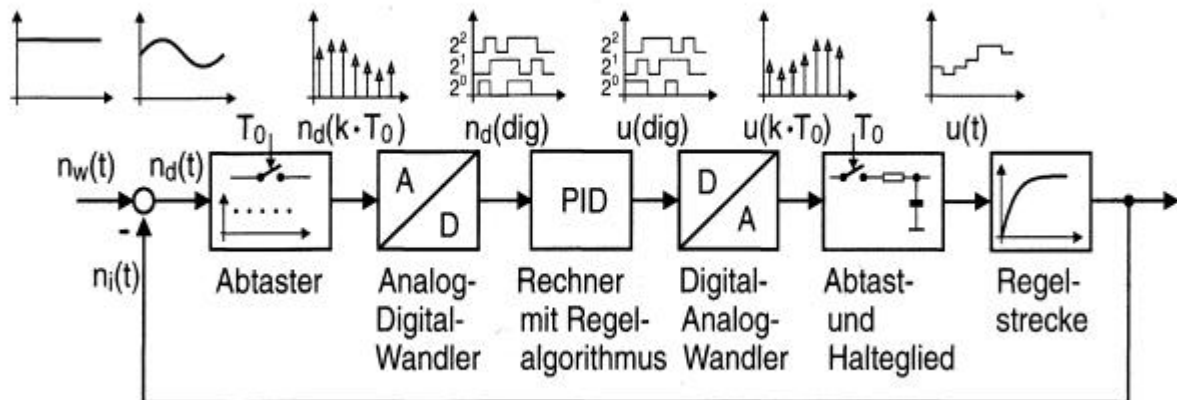


Bild 7: Digitale Drehzahlregelung eines Gleichstrommotors.
(Quelle: Roddeck: Einf. Mechatronik.)

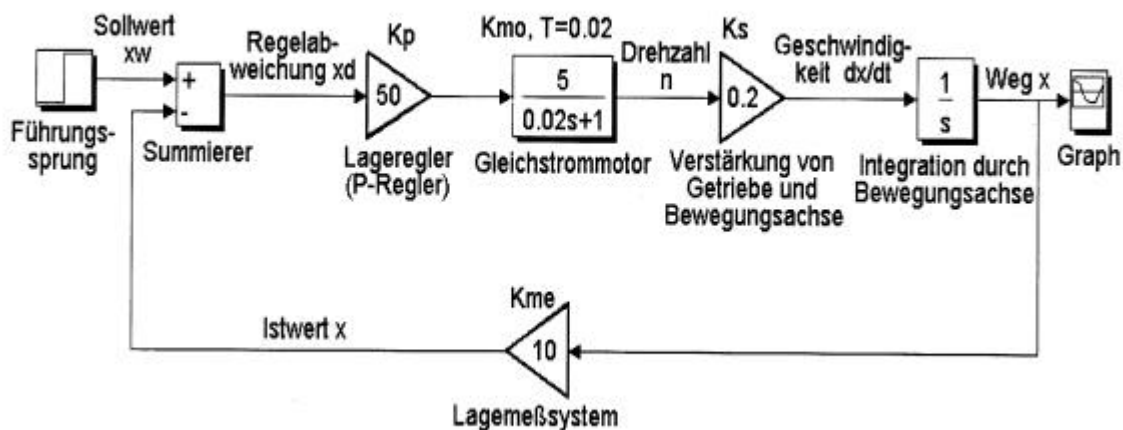


Bild 8: Lageregelkreis eines Gleichstrommotors. (Quelle: Roddeck: Einf. Mechatronik.)

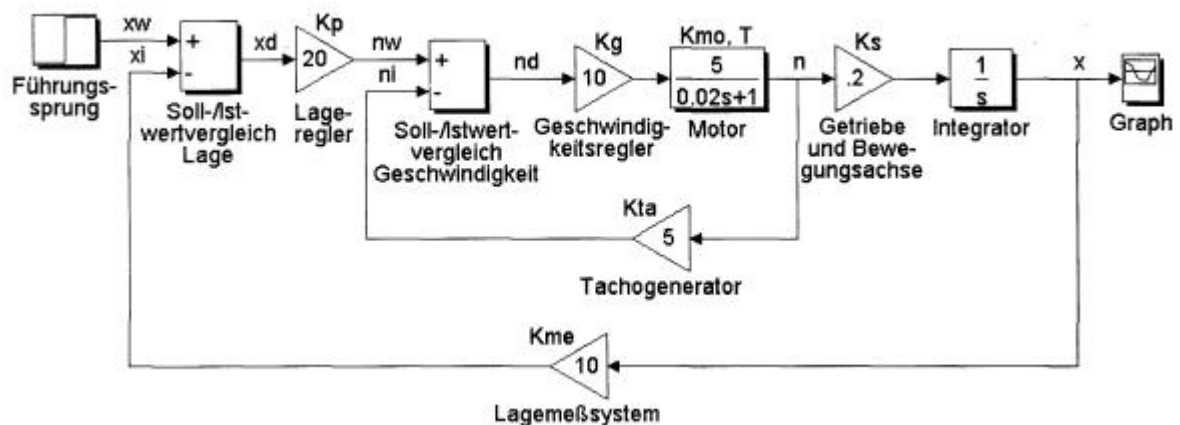


Bild 9: Lageregelkreis eines Gleichstrommotors mit unterlegter Geschwindigkeitsregelung. (Quelle: Roddeck: Einf. Mechatronik.)

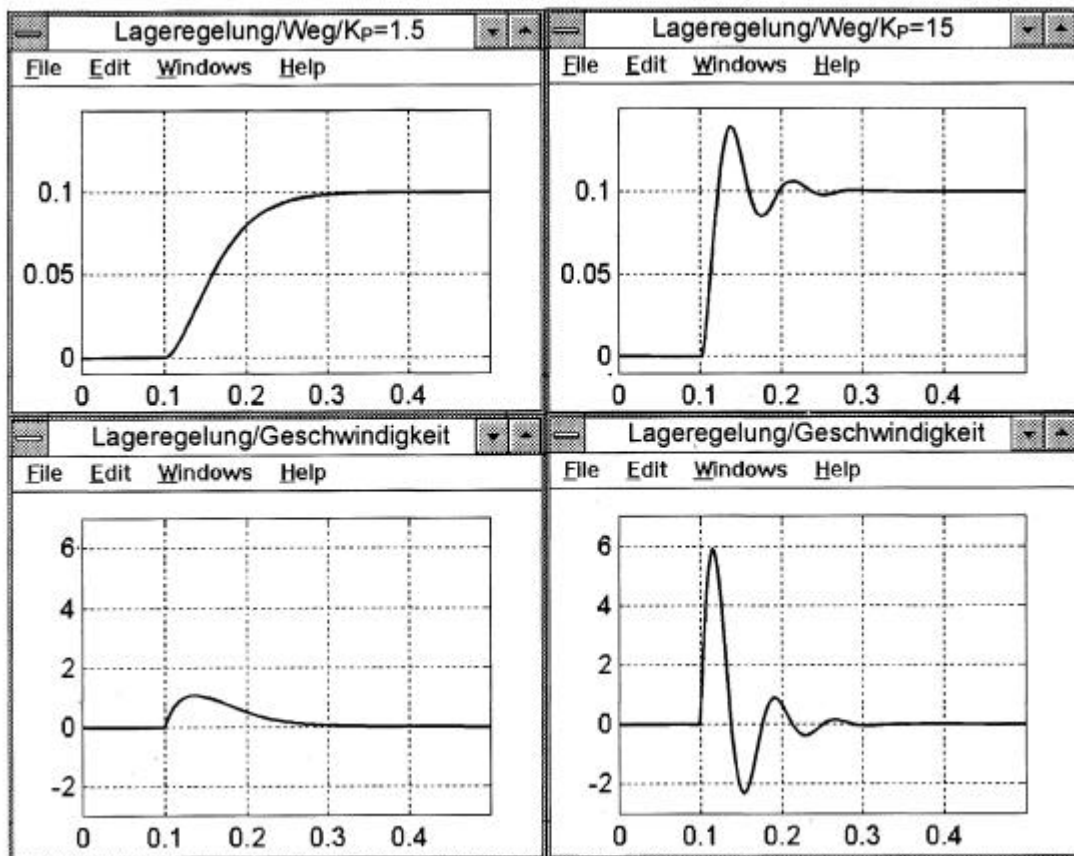


Bild 10: Verlauf von Lageabweichung und Geschwindigkeit bei einem Lageregelkreis eines Gleichstrommotors. (Quelle: Roddeck: Einf. Mechatronik.).

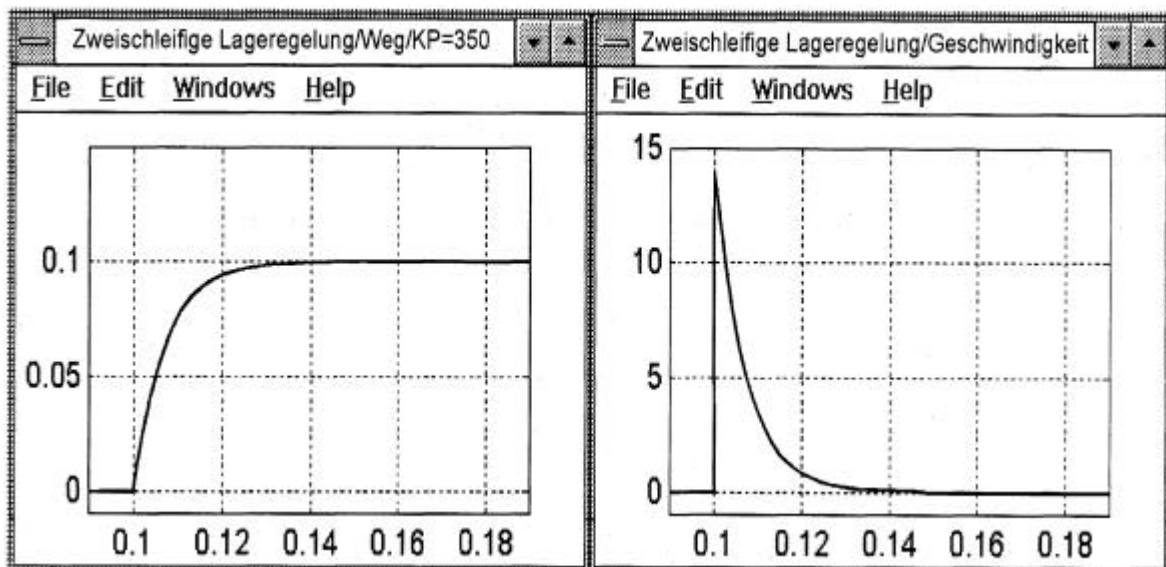


Bild 11: Verlauf von Lageabweichung und Geschwindigkeit bei einem Lageregelkreis eines Gleichstrommotors mit Geschwindigkeitsregelung. (Quelle: Roddeck: Einf. Mechatronik.).

Rapid Prototyping für mechatronische Funktionen

Entwicklungsaufgabe: Umsetzung von logischen Funktionen in Hardware

Beispiele

Lageregler oder Drehzahlregler in Kfz-Elektronik

Antriebsmanagement, Motormanagement, automatisches Getriebe

ABS, ESP, Antischlupfregelung

Stufen der kombinierten Hard- und Software-Entwicklung

1. Entwicklung elektronischer/mechatronischer Konzepte und Funktionen
2. Off-line Simulation des Verhaltens mit Mathematik-Programm
3. Echtzeit-Simulation der Funktion auf standardisierter und leistungsfähiger Universal-Hardware und Erprobung, zum Teil im Feld
4. Bau der Hardware (Steuergerät, Regler) in der Zieltechnologie, z. B. Mikrocontroller
5. Übertragung der aus der Simulation vorhandenen Algorithmen/Programme hierauf
6. Hardwaretest in the Loop; der Hardware-Simulator stellt die Umgebung, z. B. das Fahrzeug elektronisch dar
7. Erprobung der kombinierten Hardware/Software unter kontrollierten Laborbedingungen
8. Felderprobung der kombinierten Hardware/Software
9. Entscheidung über weitere Umsetzung bis zur Serie

1. Off-line Simulation auf PC oder Workstation

- Modellbildung in Matlab/Simulink oder MatrixX/Controlbuild
Dieses ist im wesentlichen ein Solver für Differentialgleichungssysteme
Programmierung z. B. in Form von Simulink Blockdiagrammen
- Numerische Untersuchung des Algorithmus, nicht in Echtzeit
- Optimierung des Programmes
Parameterstudien, grundsätzliches Verhalten

Alternativen:

- Programmierung in Hochsprache
- Ersatzmodell in SPICE oder ELDO, etc. (Schaltungssimulator)

Vorteile Matlab/Simulink:

- Verbreitetes Programmtool
- Kombination von analogen und digitalen Funktionen
- Bibliotheken für mechanische und elektronische Elemente
- Nachbildung komplexer Funktionen, z. B. Regler, Stellglieder, etc
- Anbindung an Hardwaretest bis weiter zur Hardware-Herstellung

Entwicklungswerkzeuge für Simulation in der Mechatronik

Ursprünglich:

- Übertragung auf elektrisches Ersatzschaltbild und Lösung beispielsweise mit SPICE
- Proprietäre, speziell entwickelte Mechatronik-Programme, z. B. bei Bosch u. a.

Heute:

Einsatz allgemeiner Mathematik bzw. Simulationsprogramme, welche folgende Modellbibliotheken enthalten, z. B. MATLAB/SIMULINK

- elektrische Funktionen
- Mechanische Elemente
- Regelungstechnische Komponenten

Die Hersteller der Tools erweitern diese z. Teil Anwendungsspezifisch.

Folgende Erweiterungen existieren:

Koppelung mit Hardware-Simulatoren, z. B. dSPACE

Erzeugung von Softwarecode für eingebettete Prozessoren

Weiterhin gibt es objektorientierte Simulationssprachen (DYMOLA)

Tool	Matrix-X	Matlab/Simulink	ASCET-SD
Bedienbarkeit	proprietäre Bedienphilosophie	Windows Standard	Windows Standard
Eingabehilfen	viele	-	ja
Code für Applikationstool	ja	noch nicht	(integriert)
"Code auf Knopfdruck"	ja	noch nicht	ja
Nachbearbeitung erforderlich	nein	bis jetzt noch	nein
Multitasking-fähiger Code	ja	ja	ja
Zeitl. Asynchrone Tasks ohne Delay	ja	?	ja
Lesbarkeit des Codes / Code-Struktur	gut lesbar	hohe Schachtelungstiefe, komplexe Struktur	nb
Integercode möglich	ja	ja	ja
Modellbestand für Motorsteuerung	ja	nein	nein (nicht bei DC-AG)
Kopplung zum SGML-Dokumentationssystem	ja	nein	nein

Tabelle 3: Vergleich von Modelliertools für elektronische und mechatronische Systeme in der Kfz-Industrie. (Quelle: DaimlerChrysler AG, 1998).

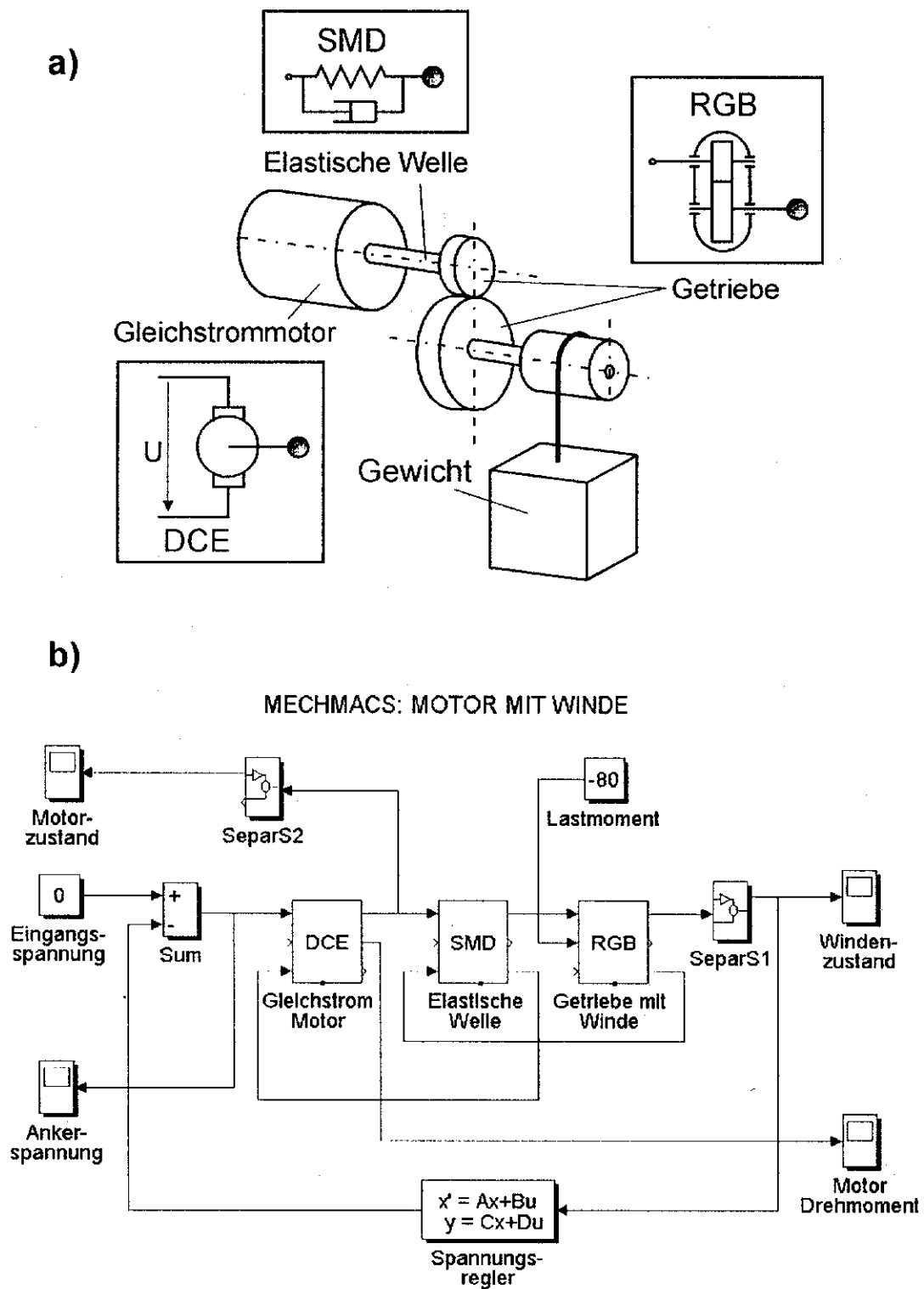


Bild 12: Modellierung eines elektromechanischen Fördersystems aus DC-Motor und Winde mit SIMULINK. (Quelle: Roddeck).
a: Schema b: Blockschaltbild.

2. Hardware Simulation auf spezieller Test-Hardware, z. B. dSPACE System

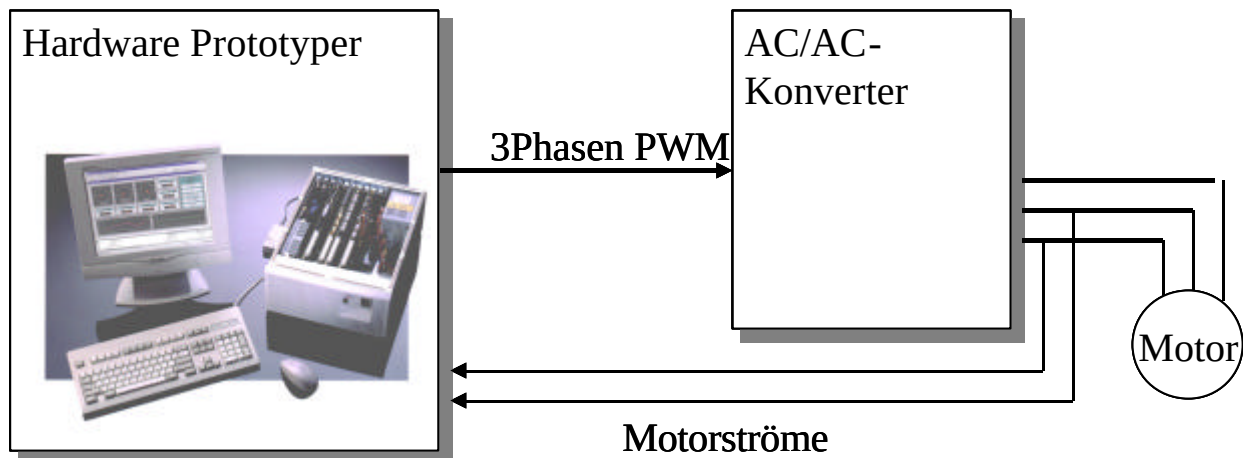


Bild 13: Hardware Prototyping

Hier sollen elektronische Funktionen, z. B. der Lageregler in Echtzeit untersucht werden

(Virtueller ECU-Prototyp)

Die Simulations-Hardware besteht im wesentlichen aus folgenden Komponenten:

- Schneller Rechner zur Real-time-Simulation der mechatronischen Funktion des darzustellenden Steuergerätes oder Reglers
- Ein-Ausgaberechner (Laptop) , z. B. mit graphischer Oberfläche (Control-Panel) für die Änderung von Versuchseinstellungen, Erfassung von Meßwerten, etc
- Interfaces zur Verbindung mit der Umgebung, z. B. Fahrzeug

Anwendung

- Untersuchung des Algorithmus, in Echtzeit
- Optimierung der Parameter
- Parameterstudien, grundsätzliches Verhalten in Echtzeit

Die Umgebung (Mechanik) kann entweder schon existieren oder sie wird elektrisch simuliert.

Vorteile:

- die Elektronik-Hardware für die Mechatronik muss noch nicht in der Zieltechnologie existieren, sondern es wird ein sehr leistungsfähiges Universal-Rechnersystem eingesetzt.
- Die mechatronische Funktion kann sehr frühzeitig getestet werden

3. Hardware-in-the-loop-Simulation

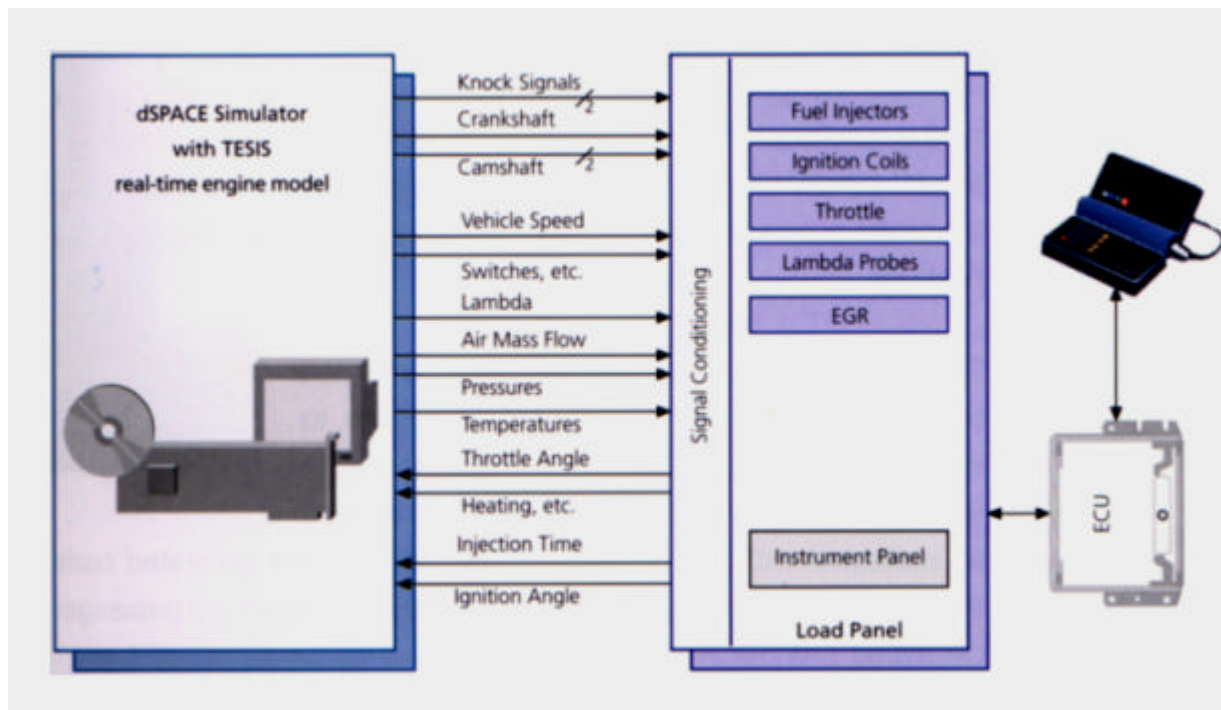


Bild 14: Hardware-in-the-Loop-Test

- Hier existiert das zu untersuchende Steuergerät des mechatronischen Systems bereits als Prototyp
- Die Software für das Steuergerät (ECU) kann automatisiert generiert werden
- Das Testsystem simuliert das Verhalten der Umgebung, z. B. des mechanischen Anteiles aus E-Motor, Getriebe, Kfz-Antriebsstrang, etc.

Die Simulations-Hardware besteht im wesentlichen aus den o. g. Komponenten:

- Schneller Rechner zur Real-time-Simulation der Umgebung und Erfassung von Meßwerten
- Graphischer Rechner zur Durchführung und Auswertung der Versuche
- Interfaces zur Verbindung mit der Umgebung, z. B. Fahrzeug

Anwendungen:

- Untersuchung des Gesamtsystems aus Hardware und Software in Echtzeit
- Parameterstudien, grundsätzliches

Vorteile:

- Die Elektronik-Hardware für die Mechatronik kann frühzeitig unter kontrollierten Labor- und Prüfstandsbedingungen getestet werden.

Wann ist der Einsatz mechatronischer Systeme sinnvoll?

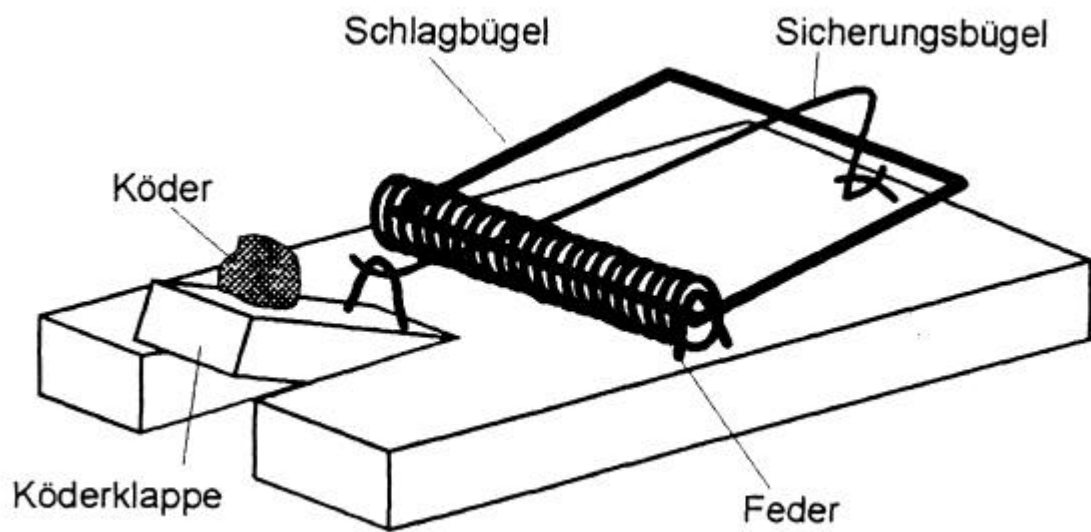


Bild 15: Die mechanische Mausefalle. Bestandteile: Sensor=Köderklappe, Steuerung=Sicherungsbügel, Aktor=Feder. Kosten: ca. 0,5 €

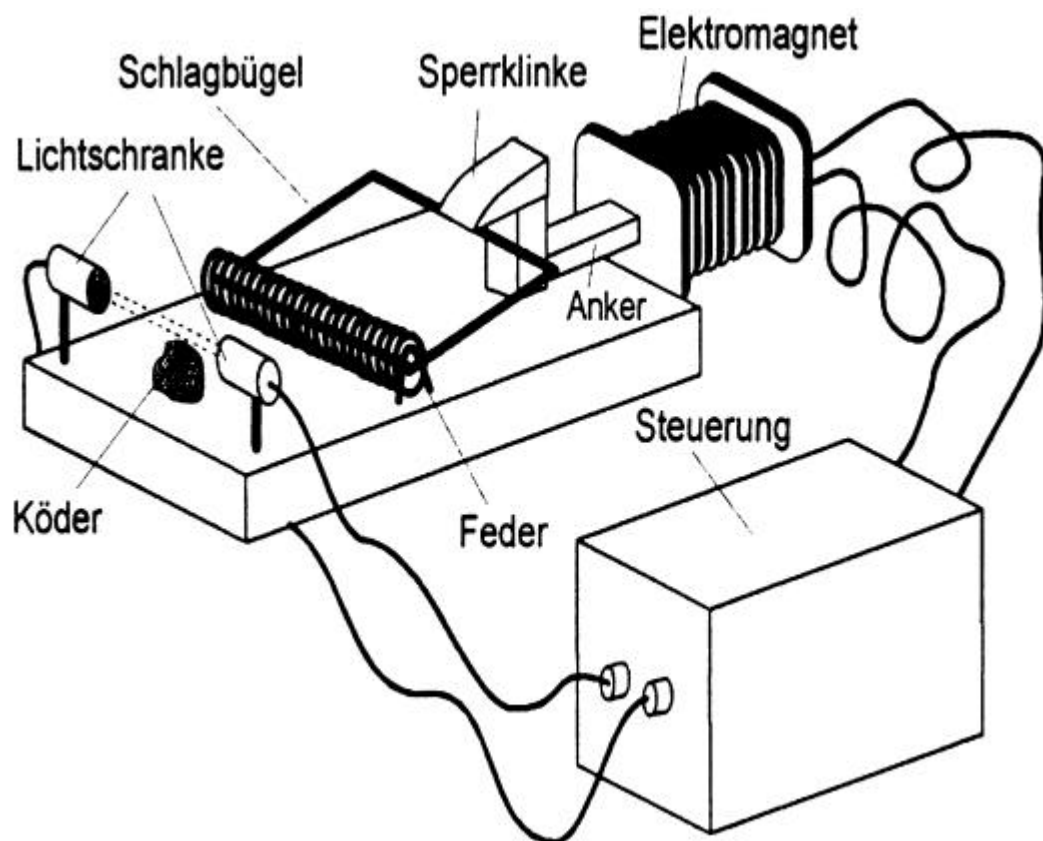


Bild 16: Die mechatronische Mausefalle. Kosten: ca. 50 €.

Mechatronik lohnt sich, wenn sich hierdurch

- signifikant niedrigere Kosten oder
- erhöhte Funktionalität
- oder verbesserte Zuverlässigkeit/Sicherheit

erreichen lassen

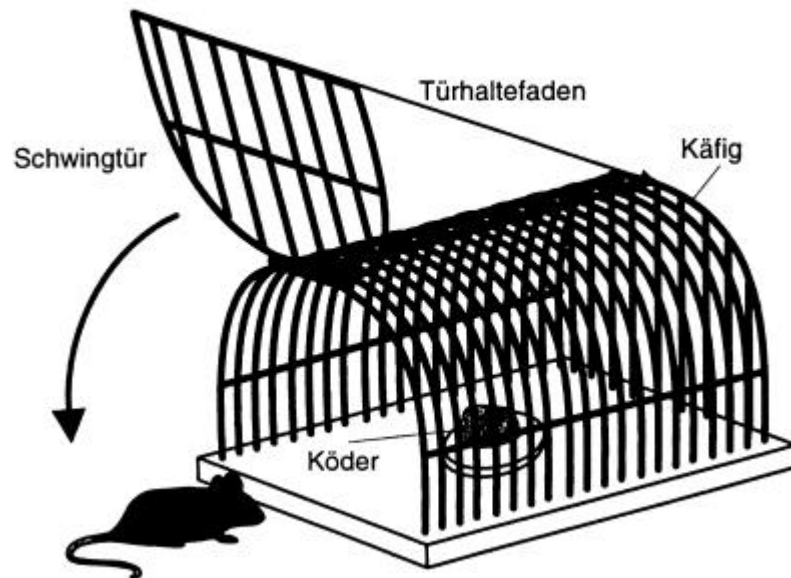


Bild 17: Die mechanische Mausefalle zum Lebendfangen von Mäusen. Mit dieser Falle kann nur eine Maus gefangen werden.

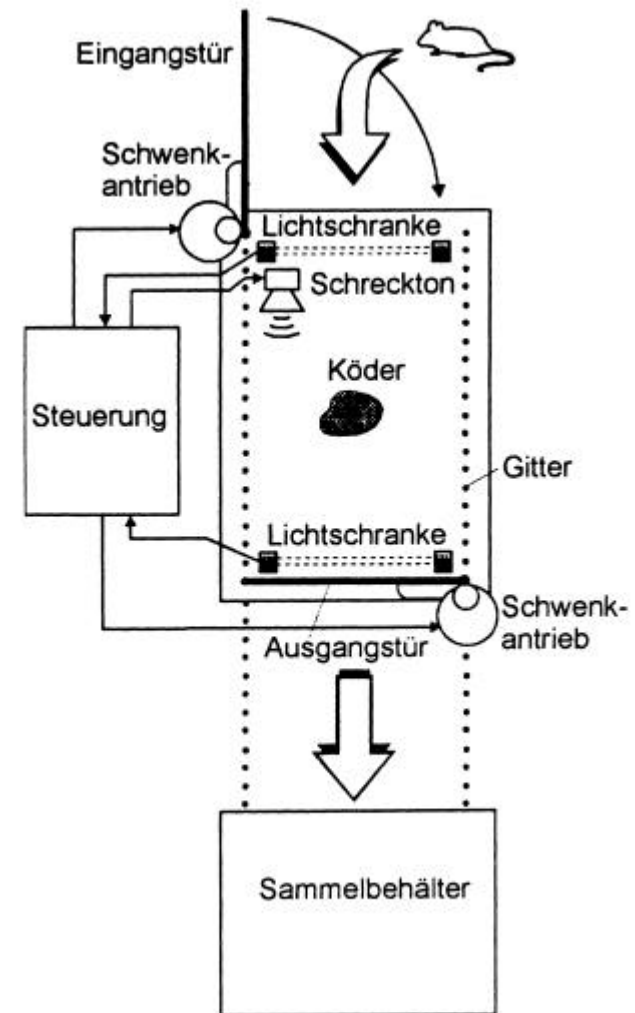


Bild 18: Die mechatronische Mausefalle zum Lebendigfangen von mehreren Mäusen.

Einsatz mechatronischer Systeme in Kfz

Realisiert

1. ABS-Systeme
2. ESP-Systeme
3. Diesel-Einspritzsysteme
 - Common-Rail
 - PLD Pumpe-Leitung-Düse

Kurzfristig

4. Elektronisch kommutierte Lüftermotoren
5. Integrierte Lenkhilfspumpe

Längerfristig

6. Elektromagnetische Ventilsteuerung
7. Steer-by-wire Aktuatoren
 - Lenkungs-Aktuatoren
 - Lenkrad-Aktuator
8. Brake-by-wire Aktuatoren
 - Bremskraft-Aktuator
 - Pedalkraft-Aktuator
9. Aktuatoren für aktives Fahrwerk

Beispiel mechatronischer Integration: Bürstenloser Gleichstrommotor für Pkw-Kühler

Nachteile:

- Erhöhte thermische und /oder mechanische Belastungen der Elektronik

Vorteile der Mechatronik

- Verminderte Kosten
- Höhere Zuverlässigkeit
- Geringeres Gewicht
- Höhere Unempfindlichkeit gegen äußere EMV

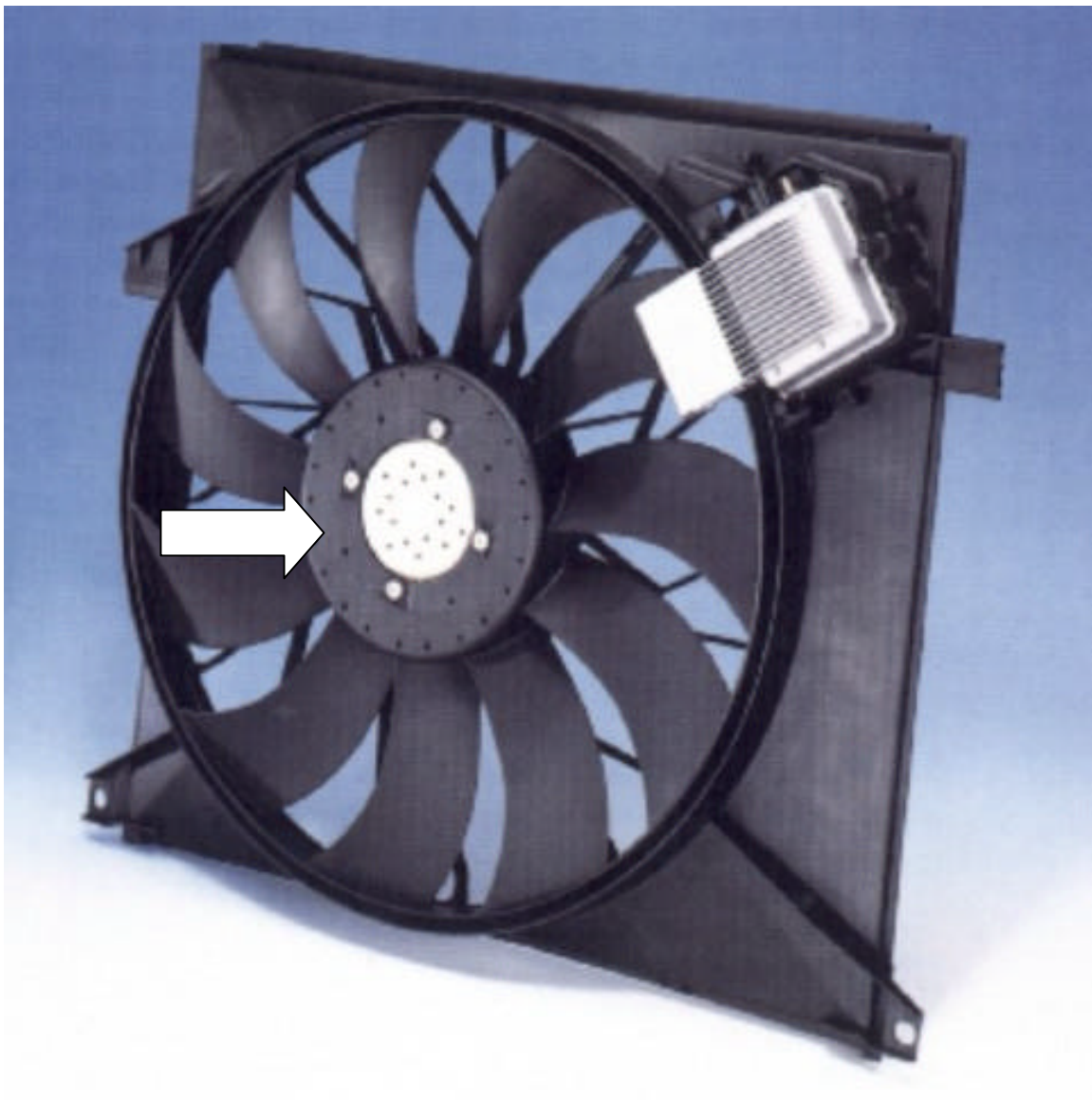


Bild 19: High Power Bürstenloser Pkw Lüfter mit separatem Motor und ECU. Serienproduktion der Temic. Leistungsaufnahme 850 W @ 12 V.

Kernproblem: Wärmehaushalt durch Integration

- Umgebungsbedingungen bis 120 °C.
- Temperaturgrenzen der Hardware
 - 130 °C ($\Delta T_a = 10$ K) für Leiterplatte FR5 und Kontroll-Elektronik
 - 150 °C ($\Delta T_f = 30$ K) für die Leistungselektronik.

Leistungsaufnahme

Verlustleistung in einem Leistungstransistor (Dummy) : ca. 10 W, 6 FETs entspricht Verlusten im Transistor beim Nennstrom von $I = 55$ A
zusätzlich Motorverluste >10 W

Maße

Gehäusedurchmesser 175 mm.
Länge der Finnen 29 mm bis 50 mm

Designschritte in der Prototypentwicklung

- CAD-Entwurf
- Thermische Simulation
- Fertigung durch spanende Bearbeitung
- Messtechnische Überprüfung

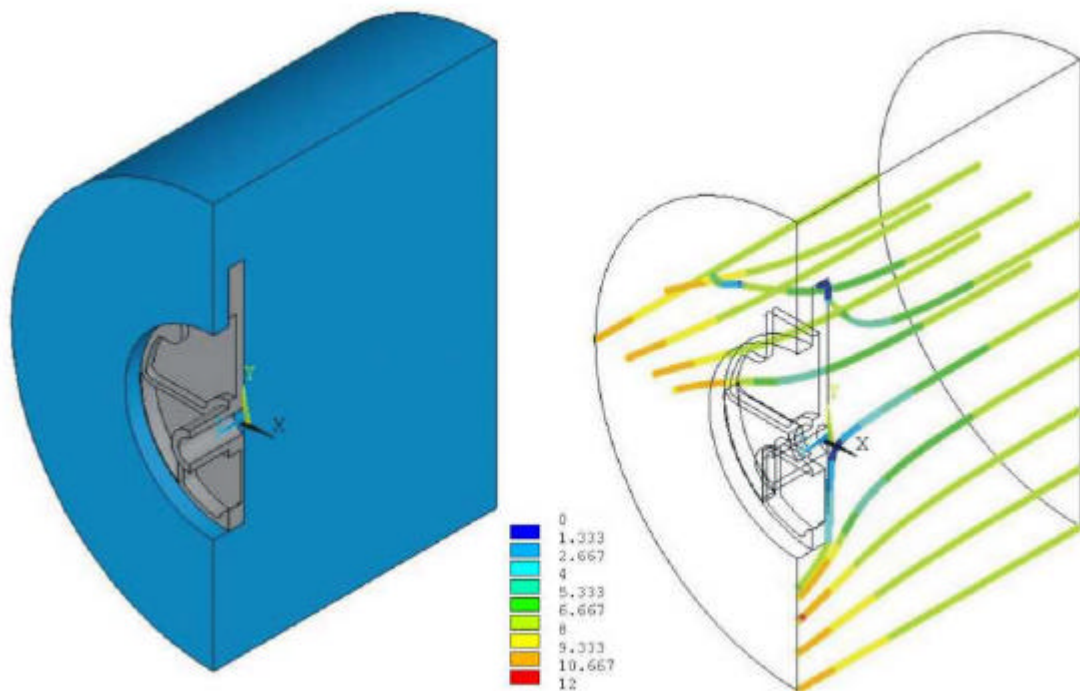


Bild 20: Virtueller 3D Windkanal (links) für Visualisierung der Strömung (rechts) um das Gehäuse. Farben zeigen Geschwindigkeiten zwischen 0 m/s (blau) und 12 m/s (rot) an.

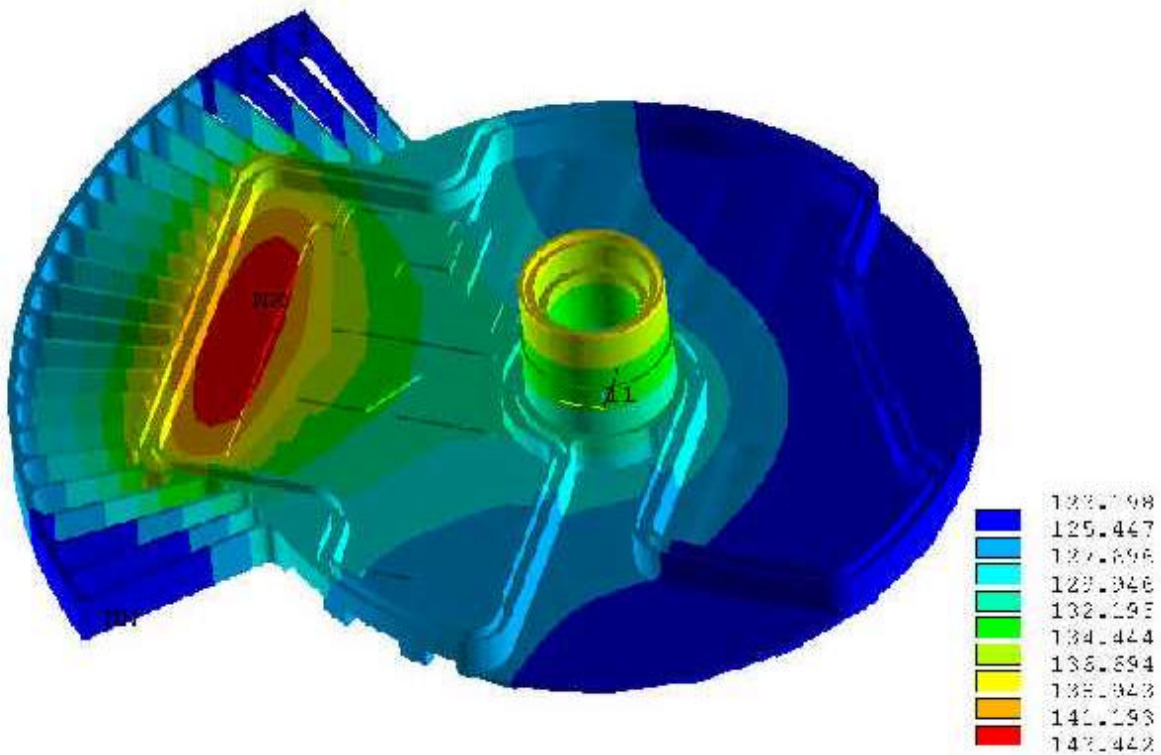


Bild 21: Gehäuse mit Kühlrippen. Temperaturverteilung mit $T_{\max}=143.5\text{ °C}$ bei $P=60\text{ W}$, $P_s=10\text{ W}$, $\alpha_b=100\text{ W/m}^2\text{K}$ (Basis), $\alpha_f=120\text{ W/m}^2\text{K}$ (Finger)

Kernproblem: Wärmehaushalt durch Integration

- Umgebungsbedingungen bis 120 °C.
- Temperaturgrenzen der Hardware
 - 130 °C ($\Delta T_a = 10$ K) für Leiterplatte FR5 und Kontroll-Elektronik
 - 150 °C ($\Delta T_f = 30$ K) für die Leistungselektronik.

Leistungsaufnahme

Verlustleistung in einem Leistungstransistor (Dummy) : ca. 10 W, 6 FETs entspricht Verlusten im Transistor beim Nennstrom von $I = 55$ A
zusätzlich Motorverluste >10 W

Maße

Gehäusedurchmesser 175 mm.
Länge der Finnen 29 mm bis 50 mm

Designschritte in der Prototypentwicklung

- CAD-Entwurf
- Thermische Simulation
- Fertigung durch spanende Bearbeitung
- Messtechnische Überprüfung

Temperaturmessungen bei $T_{\text{amb}} \approx 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Sensorpositionen

T1-T5: zwischen den sechs Dummy Power Transistoren

Tb: Übergang Motorlamination Gehäuse an Basis

Ta: Microcontroller

TFb: Basis der Mittelrippe

TFm: Mitte der Mittelrippe

TFe: Ende der Mittelrippe

TFx: Äußerste Finnenecke

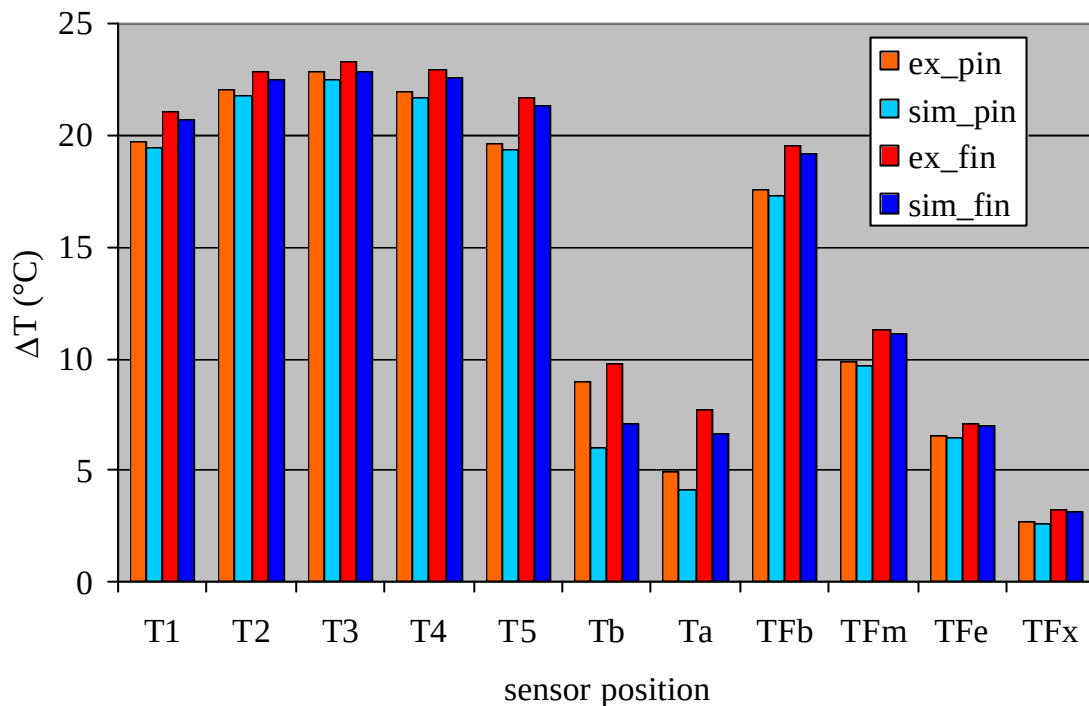


Bild 24: Temperaturanstieg bei maximaler Verlustleistung. Daten für Rippen- und Fingerstruktur. Vergleich von Experiment (ex_fin, ex_pin) und Simulation (sim_fin, sim_pin) an unterschiedlichen Sensorpositionen.

Ergebnis:

Finger statt radialer Rippen vermindert die Temperaturdifferenz

- an den Power Transistoren um 11 % und
- am Controller um mehr als 8 %.
- $P_s=30$ Watt Verlustleistung des Motor erhöhen die Temperatur im FET um ca. 2 K und im Controller um ca. 5 K.

Abhängigkeit vom Lüfter-Betriebszustand:

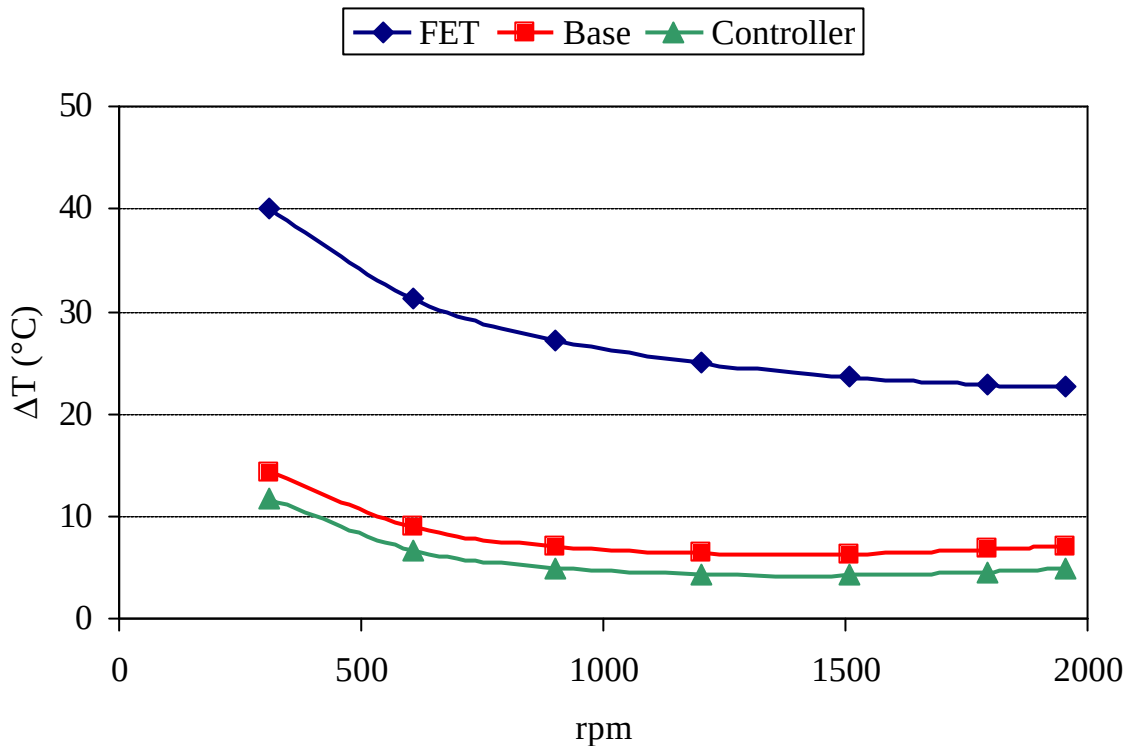


Bild 25: Messung des Temperatur-Anstiegs in Abhängigkeit von der Lüfter-Drehzahl bei einer Verlustleistung von $P = 60$ W. Zusätzliche Motorverluste tragen zum Temperaturanstieg bei.

Literaturhinweise:

W. Roddeck: Einführung in die Mechatronik. Teubner Verlag 1997.

H. Joachim: Leistungselektronik – ein Leitfaden für Einsteiger. Fa. Klöckner Moeller 1990.

L. Constantinescu-Simon, A. Franz und K. Saal: Elektrische Maschinen und Antriebssysteme. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg Verlag 1999.

Weitere Literatur zu E-Motoren findet sich in Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau.