16SV3562

Entwicklung eines textilintegrierten MST-Sensor-systems zur Erkennung von Sitzbelegung und Sitzposition in Kraftfahrzeugen

- SeatSen –

Teilvorhaben:

Entwicklung der Sensorelektronik und Integration des Sensorsystems

Abschlußbericht

Bearbeitungszeitraum:
01.10.2007 bis 31.12.2010

GEMAC-Gesellschaft für Mikroelektronikanwendung Chemnitz mbH
Zwickauer Straße 227, 09116 Chemnitz

Inhaltsverzeichnis

1. AUFGABENSTELLUNG ... 3

2. VORAUSSETZUNGEN ... 4

3. PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS ... 6

4. STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK VOR PROJEKTBEGINN ... 8

4.1. STAND AUSWERTESYSTEME FÜR SITZBELEGUNG ... 8
4.2. VORAUSSETZUNGEN DER GEMAC ... 9

5. ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN ... 10

6. WISSENSCHAFTLICH – TECHNISCHE ERGEBNISSE ... 11

6.1. ANFORDERUNGSMATRIX ... 11
6.2. SENSORAUSWAHL ... 11
6.3. INTEGRIERTE SENSORELEKTRONIK ... 12
6.3.1. Konzeption ... 12
6.3.2. ASIC Design ... 15
6.4. PRÄPARATION UND TEST (AP4) ... 16
6.4.1. Präparation ... 16
6.4.2. Meßergebnisse ... 17
6.5. INTEGRATION ZUM MIKROSYSTEM, OPTIMIERUNG DER SENSORELEKTRONIK (AP5) ... 20
6.5.1. Entwicklung Sensorelement ... 20
6.5.2. Redesign ASIC ... 23
6.6. INTEGRATION IN DEN GESAMTAUFBAU DES SITZES (AP6) ... 23
6.6.1. Anordnung der Sensoren ... 23
6.6.2. Programmier – und Auswerteeinheit ... 25
6.6.3. Aufbau und Test von Labormustern / Sicherung der Zuverlässigkeit (AP7) ... 27

7. VERGLEICH DES STANDES DES VORHABENS MIT DEM URSPRÜNGLICHEN ARBEITS-, ZEIT- UND FINANZIERUNGSPLAN ... 30

8. NUTZUNG DER PROJEKTERGEBNISSE ... 31

9. FORTSCHRITTE AUF DEM ARBEITSGEBIET DES VORHABENS BEI ANDEREN FORSCHUNGSEINRICHTUNGEN UND UNTERNEHMEN ... 31

10. FORTFÜHRUNG DER ARBEITEN ... 32

11. VERÖFFENTLICHUNGEN ... 32

1. Aufgabenstellung

Ziel des Verbundprojektes war die Entwicklung eines integrierten, intelligenten Belegungssensors für Autositze. Die Motivation ergab sich aus der Notwendigkeit der Erfassung von Informationen über die aktuelle Sitzbelegung, die Statur und die Sitzhaltung der Fahrzeuginsassen, um die Steuerung bzw. Auslösung der Airbags optimieren zu können, sowie aus der Tatsache, daß die bislang verfügbaren Sitzbelegungssensoren eine an die aktuelle Belegungssituation angepaßte Airbagsteuerung nicht gestatten. Über den mikrosystemtechnischen Ansatz eines textil integrierten Sensorsystems sollten die bekannten Nachteile der vorhandenen Systeme vermieden und gleichzeitig im Vergleich zum Stand der Technik ein bedeutender Fortschritt hinsichtlich der Integration von Textil- und Elektronikkomponenten erreicht werden. Im Projekte waren insbesondere die sich aus der für das Thema Belegungssensor relevanten US-Norm „Federal Motor Vehicle Safety Standard 208“ (kurz FMVSS 208) ergebenden Randbedingungen zu beachten.

Konkret bestand das Ziel darin, einen robusten und bei einer in Fahrzeugen üblichen Belastung über die gesamte Lebenserwartung des Fahrzeugs zuverlässig arbeitenden Sensor zu entwickeln, der in heute übliche Autositze, z.B. in die Polsterung, integriert wird. Dabei waren weitere Randbedingungen zu beachten, z.B.:

- Einbindung in die Fahrzeugtechnik über Funk bzw. Kabel
- Berücksichtigung von Sondereinflüssen, z.B. durch eine Sitzheizung
- Unempfindlichkeit gegen Flüssigkeiten (Wasser, Cola, etc.)
- leichte und kostengünstige Austauschbarkeit

Der Einsatz des im Projekt zu entwickelnden Sitzbelegungssensors sollte zu einer Erhöhung der Sicherheit in Personenfahrzeugen führen, insbesondere durch

- zuverlässige und genaue Datengewinnung für die im Fahrzeug integrierten Personenschutzsysteme sowie
- die Erweiterung des Umfangs der bereitgestellten Daten und damit der Möglichkeit differenzierter Reaktionen der Überwachungs- und Sicherheitssysteme.

In Hinblick auf die Umsetzung der Forschungsergebnisse in ein marktfähiges Produkt waren nicht nur die technische und ökonomische Machbarkeit, sondern auch die Einhaltung der bestehenden Richtlinien und Vorschriften bis zum Fahrzeugrecycling und die Schaffung der technischen Grundlagen für eine erfolgreiche Zertifizierung im Mittelpunkt wichtige zu bearbeitende Problemkreise.

Dazu kamen Grundlagenuntersuchungen in den folgenden Bereichen:

- Fragen der Standardisierung (z.B. hinsichtlich der Schnittstellen textilbasierter Mikrosysteme zur Fahrzeugelektronik)
- Verbindungstechniken und Zuverlässigkeit textilbasierter Mikrosysteme
- produktionsintegrierte Testverfahren zur Qualitätssicherung

Innerhalb des Verbundvorhabens waren von der GEMAC folgende Problemkreise zu bearbeiten:

- Auswahl eines geeigneten Sensors gemeinsam mit den anderen Projektpartnern
- die Elektronikentwicklung für die Sensorsignalaufbereitung und –vorverarbeitung,
- die Umsetzung dieser Schaltung in einen ASIC
- die Entwicklung einer geeigneten Aufbau- und Verbindungstechnik für die angestrebte Zweichip-Lösung des Drucksensorsystems aus Sensor und Sensorelektronik
- die Entwicklung einer geeigneten Schnittstelle zur Verbindung des Sensorsystems mit dem Textil

Aufbauend auf den vom Halbleiterhersteller bezogenen Funktionsmustern der ASICs hatte die GEMAC Sensorsysteme zu erstellen und den anderen Projektpartnern zum Test sowie zur Integration in den Fahrzeugsitz zur Verfügung stellen. Abschließend erfolgte die Mitarbeit am Test des kompletten Sitzbelegungserkennungssystems.

Der wesentliche innovative Inhalt dieser Arbeiten bestand in der Entwicklung des Sensorsystems selbst, wobei hier insbesondere Fragen der zuverlässigen Sensorsignalaufbereitung unter den Bedingungen des Automobileinsatzes, der notwendigen EMV-Maßnahmen zum Ausschluß möglicher Beeinträchtigungen durch Kfz-typische Störquellen sowie die Gestaltung der Verbindung zum textilen Übertragungsmedium eine Rolle spielten. Weiterhin waren Untersuchungen zur Anzahl und zur Positionierung der Sensoren notwendig, um möglichst genaue Daten über die aktuelle Sitzposition des Fahrzeuginsassen zu erhalten, auf der anderen Seite aber auch die Anzahl der zu implementierenden Sensoren minimieren zu können.

Die Gestaltung des Sensors und der Sensorelektronik in Form eines anwenderspezifischen Schaltkreises, die AVT sowie die paßgenaue Positionierung des Sensorsystems waren anspruchsvolle Ziele. In allen Projektphasen wurde daher eng mit allen Projektpartnern zusammengearbeitet.

2. Voraussetzungen

Das Projekt setzte die enge Zusammenarbeit zwischen Textil-, Mikroelektronik- und Mikrosystemspezialisten mit den entsprechenden Zulieferern bzw. Finalproduzenten der Automobilindustrie voraus. Die Zusammensetzung des Verbundvorhabens wurde diesen Anforderungen vollständig gerecht:

TITV (Textilforschungsinstitut Thüringen-Vogtland e.V.)

TITV übernahm die Projektsteuerung, die Projektkoordination und die Öffentlichkeitsarbeit für SeatSen. Neben der textilorientierten Forschung bearbeitete das TITV die Aufgabenkomplexe zur Integration von Mikrosystemtechnik ins Textil sowie zur Oberflächenmodifizierung von Textilien und flexiblen Materialien. Die Arbeiten im Projekt konzentrierten sich auf folgende Schwerpunkte:

- Leitfähige Textilmaterialien und deren elektrochemische Modifizierung
- Textile Mikrosystemtechnik und elektronische Schaltungstechnik auf Textilsubstraten einschließlich der textilorientierten Aufbau- und Verbindungstechnik
- 3D-Textilien für den Automobilinnenraum
- Softwareentwicklung für textile Produktionsprozesse (Jacquardweberei)
- Funktionalisierung von Textilien durch Beschichtungstechniken, insbesondere zur Passivierung und Verstärkung

Audi AG

Die AUDI AG ist ein Fahrzeughersteller und setzt in ihren Fahrzeugen neue innovative Techniken ein. Die Arbeiten der AUDI AG im Projekt konzentrierten sich auf folgende Schwerpunkte:

- Definition und Einbringung der technischen Vorgaben (bestehende Lastenhefte, Anforderung aus dem Bereich der Fahrzeugelektronik, Komfortvorgaben)
- Vorgabe der Zertifizierungsrichtlinen, basierend auf den bereits heute eingesetzten Prüfverfahren
- Test des Systems im Fahrzeug, d.h. Überprüfung der Funktionalität

Der im Premiumsegment tätige Kfz-Produzent sichert gleichzeitig als potentieller Erstanwender durch den geplanten Einsatz der im Projekt entstandenen Systeme die Erfüllung wesentlicher wirtschaftlicher Zielstellungen des FuE-Vorhabens.

Car Trim GmbH

Car Trim als Hersteller von Fahrzeugsitzen und Sitzkomponenten war im Projekt zuständig für den Einbau des Belegungserkennungsmoduls in den Sitz. Hierzu zählten folgende Teilaufgaben:

- Definition von Bauform und Baugröße des in den Sitz einbaufähigen Sensormoduls
- Modultests im Sitz
- Sicherung der serienfähigen Montagemöglichkeit des Sensormoduls
- Abstimmung und Erprobung der mechanischen Kompatibilität und Ermittlung der optimalen Paßform des Moduls im gesamten Sitzaufbau

Würth Elektronik GmbH & Co. KG

Würth Elektronik übernahm folgende Aufgaben:

- Einbringen der Erfahrungen zum Einbetten von Bauelementen (Halbleiter-ICs und passive Komponenten) in die Dielektrikumslage einer Leiterplatte
- Schnittstellendefinition und Systemintegration für flexible Leiterplatten und textile Strukturen. Dies beinhaltete die Aufbau- und Verbindungstechnik für dünne Bauformen und flexible Verdrahtungen sowie die lokale Versteifung und mögliche Weiterverarbeitung in etablierten elektronischen Fertigungs- und Bestückprozessen

- Empfehlungen für die Nutzung bestehender CAD/CAM Systeme für die Systementwicklung (entsprechende Designregeln, Plug-In´s)
- Berücksichtigung der Anforderungen der vom Gesetzgeber eingebrachten Vorschriften an umweltgerechte Fertigungs-Technologien (z.B. bleifreie Montage und halogenfreie Basismaterialien)

CE-SYS GmbH

Das in Ilmenau ansässige Unternehmen war zuständig für:

- entwicklungsbegleitende EMV-Prüfungen und Ableitung von EMV-Maßnahmen
- Entwicklung von Prüf- und Testverfahren
- projektbegleitende Untersuchungen zur Schaffung der Voraussetzungen für eine Typzulassung

GEMAC

Die Hauptaufgaben der GEMAC lagen vor allem in der Entwicklung und Integration der Sensorelektronik sowie in der Gestaltung der Aufbau- und Verbindungstechnik für das komplette Sensorsystem, insbesondere:

- Mitarbeit in der Spezifikationsphase (Anforderungsmatrix) und bei der Auswahl geeigneter Sensoren
- Testung unterschiedlicher Drucksensoren und Auswahl der optimalen Lösung
- ASIC-Entwicklung zur Sensorsignalerfassung und –aufbereitung für das ausgewählte Sensorprinzip
- Integration von Sensor und ASIC zum Mikrosystem (Zweichiplösung)
- Entwicklung der dazugehörigen Aufbau- und Verbindungstechnik
- Einbettung des Mikrosystems in ein geeignetes Druckübertragungsmedium
- Mitarbeit beim Aufbau und Test der Labormuster

Auf Grund der langjährigen Erfahrungen der beteiligten Projektpartner auf ihren Spezialgebieten waren trotz des hohen technischen Anspruchs der Aufgabenstellung die besten Voraussetzungen für eine erfolgreiche Projektbearbeitung gegeben.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Ziel des Projektes war eine auf den bei den Partnern vorliegenden Erfahrungen aufbauende Grundlagenentwicklung sowie zum Nachweis der angestrebten Funktionalität die Umsetzung der Ergebnisse in ein Funktionsmuster, das unmittelbar nach Projektende zu einem marktreifen Produkt weiterentwickelt werden soll.
Der Arbeitsplan der GEMAC wurde vollständig in den Gesamtarbeitsplan des Vorhabens eingeordnet:

Arbeitspaket D1: Erstellen einer Anforderungsmatrix an Sensorsystem im Sitz
Arbeitspaket D2: Auswahl geeigneter Sensoren
Arbeitspaket D3: Integrierte Sensorelektronik
D3.1: Entwicklung der Sensorelektronik
D3.2: ASIC-Design
Arbeitspaket D4: ASIC-Präparation und Test der integrierten Lösung

Arbeitspaket D5: Integration zum Mikrosystem, Optimierung der Sensorelektronik
D5.1: Sensorintegration (AVT Sensor)
D5.2: AVT Sensorsystem - Textil
D5.3: Redesign der Sensorelektronik, 2. Präparation und Test
Arbeitspaket D6: Integration in den Gesamtaufbau des Sitzes
Arbeitspaket D7: Aufbau und Test von Labormustern / Sicherung der Zuverlässigkeit
Arbeitspaket D8: Projektbegleitende Vorbereitung der Zulassung

Die GEMAC arbeitete in den Arbeitspaketen 1, 2, 6, 7 und 8 im Rahmen ihrer geplanten Aufgaben mit und war für die Arbeitspakete 3 bis 5 verantwortlich, die die ASIC-, Sensor- und für das Sensorsystem AVT-spezifischen Entwicklungsarbeiten zum Inhalt hatten.

Der Ablauf wurde so gestaltet, daß zu den im Verbundvorhaben definierten Meilensteinen die für die nachfolgenden Projektarbeiten bei den Partnern notwendigen FuE-Ergebnisse bzw. ASIC- und Sensorfunktionsmuster verfügbar waren und so der Gesamtprojektfortschritt gewährleistet wurde.
Alle Arbeiten wurden in kontinuierlicher Absprache mit den Projektpartnern durchgeführt. In regelmäßigen Abständen fanden Projekttreffen statt. Auf den Meilensteintreffen erfolgte die Freigabe der erzielten Ergebnisse für die weitere Arbeit. Auf diese Weise wurde sichergestellt, daß nachfolgende Arbeitspakete immer auf gesicherten und durch alle Partner bestätigten Ergebnissen aufbauten.

Zusätzlich zu den Projekttreffen wurden bei Bedarf gemeinsam Messungen bzw. Inbetriebnahmen durchgeführt.

Meilensteinplanung

Meilenstein 1 (M4): Sensorkonzept

Ziel von Meilenstein 1 war die Erstellung der Anforderungsmatrix für die Meßgrößenwandler sowie deren räumliche und zeitliche Auflösung. Es wurden Sensoren ausgewählt, die eine textilkompatible Verarbeitung zulassen. Neben dem Auflagedruck waren weitere Meßgrößen (insbesondere Temperatur und Beschleunigung) zu berücksichtigen, um eine Kompensation von Störgrößen zu ermöglichen. In Zusammenarbeit aller Partner wurde das Sensorkonzept bezüglich Meßprinzip, Sensorbauteilen, Schaltung, Signalverarbeitung und -auswertung sowie Schnittstellen zu externen Einheiten erstellt.

Meilenstein 2 (M11): Muster Sensorelektronik-ASIC (1.Präparation)

Zu diesem GEMAC-spezifischen Meilenstein, der zeitnah zum Meilenstein „Untersuchung der textilen Substrate“ lag, wurden durch GEMAC die getesteten ASIC-Muster der ersten Schaltkreispräparation für die Sensorelektronik bereitgestellt. Damit war die Voraussetzung für die Entwicklung des gesamten Sensorsystems als Zweichip-Lösung geschaffen.

Meilenstein 3 (M17): Integrierte Sensorsystemlösung, AVT für Sensorsystem

Mit Erreichung dieses Meilensteins war die komplette Entwicklung des Sensorsystems aus Sensorelement und Sensorelektronik verfügbar und stand den Projektpartnern zu den Untersuchungen für die Integration in den Autositz zur Verfügung.

Parallel dazu wurden zu diesem Zeitpunkt die Grundlagenuntersuchungen zur AVT zwischen Sensor und textilem Basismaterial abgeschlossen.

Meilenstein 4 (M23): Integration in den Fahrzeugsitz / Fertigungstechnologie

Aufbauend auf den Testergebnissen der ersten ASIC-Funktionsmuster sowie den Erkenntnissen der Projektpartner aus den Arbeiten zur Integration in den Autositz waren zu diesem Zeitpunkt die Testmuster des optimierten Sensorsystems, die die Schaltkreise der zweiten Präparation enthalten, verfügbar. Damit waren die Voraussetzungen für den Aufbau des gesamten Funktionsmusters des Sitzbelegungssystems geschaffen, der für den letzten Projektabschnitt geplant war.

4. Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn

4.1. Stand Auswertesysteme für Sitzbelegung

Hintergrund der mit SeatSen geplanten Entwicklung war die Optimierung des für die Auslösung und Steuerung von Airbags in Fahrzeugen benötigten Sitzbelegungs-sensors, um eine möglichst genaue Information über die Sitzbelegung zu erreichen.

Die bislang eingesetzten Systeme nutzen unterschiedlichste Technologien zur Belegungserkennung. Stand der Technik ist der Einbau von Drucksensoren in die Sitzmechanik, wobei mit zumeist vier Sensoren die Gewichtsbelastung auf dem Fahrzeugsitz detektiert wird. Einfachere Systeme nutzen eine in das Sitzpolster integrierte Druckaufnahme in Form einer Folie mit entsprechenden Drucksensoren, mehrlagigen Folienmatten oder mit Gel gefüllten Zwischenpolstern, deren Gel-Druck gemessen wird.
Darüber hinaus kommen Systeme zum Einsatz, die unabhängig vom Fahrzeugsitz arbeiten und die Sitzfläche kontinuierlich abtasten, z.B. über eine optische Sitzbelegungserkennung per Kamera.

Bei den bereits im Fahrzeugbau eingesetzten intelligenteren Sitzbelegungssensoren handelt es sich zumeist um Lösungen, die den Druck im Sitzgestell aufnehmen. Beispiele hierfür sind das AWS II System von Siemens VDO Automotive und das iBoltTM-System von Bosch. Dieses System erfüllt auch die Forderung nach Gewichtsklassifizierung auf dem Beifahrersitz. Siemens bietet hierfür mit dem Occupant Classification System (OCS) ein getrenntes System an.

Für die Bestimmung der Körperhaltung wird mit dem Videosensor iVisionTM, der im Bereich des Rückspiegels eingebaut wird, ein weiterer Modul angeboten. Ein grundsätzlich vergleichbarer Modul wird von Jaguar im Rahmen seines adaptiven Rückhaltesystems (A.R.T.S) zur Sitzpositions- und Sitzbelegungserkennung in verschiedenen Modellen eingesetzt. Delphi hat das Delphi Passive Occupant Detection System (PODS-B) entwickelt. Es besteht u.a. aus einem Drucksensor, einem Gurtdehnungssensor und einer Auswerteelektronik.

Diese Lösungen beruhen grundsätzlich auf klassischer Sensorik bzw. Elektronik. Der innovative Ansatz im vorliegenden Projektvorschlag besteht in der Verbindung von Sensorik und Elektronik mit textilen Materialien. Das ermöglicht einen höheren Integrationsgrad und führt zu einer wesentlichen Verfeinerung der den Sicherheits-

systemen (insbesondere dem Airbag) zur Verfügung gestellten Informationen, aber auch zu einer bedeutenden Kostenreduktion.

Bei den bislang eingesetzten Leiterplatten handelt es sich stets um planare Strukturen, in denen mit Hilfe additiver und subtraktiver Technologien mehrlagige Leiterbahnführungen mit Durchmetallisierungen erzeugt werden. Eine Alternative, die sich im Unterschied zur planaren Leitungsebene einer räumlich vernetzten Leiterdrahtstruktur bedient und dabei gleichzeitig ein hohes Maß an Flexibilität besitzt, war nicht bekannt. Es existieren zwar textile Flächengebilde, in denen Leiterdrahtstrukturen angeordnet sind, so daß elektrische Leitfähigkeit in einer Richtung erzielt wird oder das gesamte textile Flächengebilde elektrisch leitfähig ist. Bei diesen herkömmlichen textilen Flächengebilden handelt es sich aber um einfache, meist gleichstrukturierte Gebilde mit geringer Anforderung an die laterale Präzision. Bekannte Lösungen sind z. B. Zaunbänder und Heizmatten. Landläufig bekannt ist das Einarbeiten von elektrisch leitfähigen Drähten in Fechterkleidung zur Signalgabe. Weiterhin bekannt sind textile Flächengebilde, die elektrische Leiter zur Abschirmung von elektromagnetischer Strahlung enthalten. Diese bekannten textilen Flächengebilde sind zum Aufbau elektronischer Schaltungen nicht geeignet, da die Anforderungen der komplexen, auch auf mehreren Ebenen auszuführenden Verdrahtungstechnik elektronischer Schaltungen nicht erfüllt werden.

4.2. Voraussetzungen der GEMAC

Speziell auf dem Gebiet des ASIC-Entwurfs beschäftigen sich die Mitarbeiter der GEMAC bereits seit über 15 Jahren mit dem Design von analogen, digitalen und Mixed-Signal-ASICs. Die GEMAC arbeitet als flexibles Designhaus mit unterschiedlichen Halbleiterherstellern zusammen. Durch die zahlreichen ASIC-Projekte liegen Erfahrungen über Möglichkeiten und Grenzen der verschiedenen Technologien vor.

Moderne Simulationstools (ADVance MS-Eldo/ModelSim, QuickSim etc.) unterstützen die Entwicklung auch bei komplexen analog-digitalen Schaltungsentwürfen. Diese Simulatoren sind eingebettet in eine durchgehende Entwicklungsumgebung von Mentor Graphics (ADVance MS, IC-Station mit Calibre, DA-IC mit VHDL/Verilog Synthese-Design-Flow), so daß von der Modellierung (Schaltungseingabe) bis hin zu Layout, Testmustererstellung und Dokumentation eine einheitliche Datenbasis gewährleistet ist.

Auch auf dem Gebiet der Sensorentwicklung sowie der Auswertung von Sensorsignalen ist in der GEMAC umfangreiches Wissen vorhanden. So gehören u.a. eigene mikrosystembasierte Sensorfamilien für Neigung und Beschleunigung zu dem von der GEMAC angebotenen Produktspektrum.
Damit besitzt die GEMAC sowohl auf dem Gebiet des ASIC-Designs als auch der Entwicklung und Fertigung von Sensoren und Mikrosystemen die notwendigen Kompetenzen, um die hohen technischen Risiken des Projektes in gemeinsamer Arbeit mit den Projektpartnern erfolgreich meistern zu können.

Für die Integration der Elektronik in einen ASIC standen zu Projektbeginn unterschiedliche SOI-, GeSi-, CMOS- bzw. BiCMOS-Technologien mit minimalen Strukturbreiten bis 0,18 µm zur Verfügung. Für die zu integrierenden, überwiegend analogen Schaltungen ist das Kriterium geringster Strukturbreiten von

untergeordneter Bedeutung, da sich bestimmte Eigenschaften von z.B. MOS-Transistoren unabhängig von der gewählten Strukturbreite nur über deren physische Größe erreichen lassen. Entscheidendes Auswahlkriterium für das Projekt war die Robustheit und das Preis- Leistungsverhältnis. Aus diesem Grund richtete sich der Fokus auf die 0,6µm-CMOS-Technologie der XFAB.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

GEMAC ist in Bezug auf die Halbleiterfertigung ein sogenanntes „fabless“ Unternehmen. Das heißt, daß die Entwicklung integrierter elektronischer Schaltungen im Hause erfolgt, die Fertigung jedoch außerhalb. Im Projekt wurden Unteraufträge an folgende Unternehmen vergeben:

- Aktiv Sensor GmbH (Unternehmen der EPCOS AG)
- X-FAB Semiconductor Foundries AG
- Microelectronic Assembly Frankfurt(Oder) GmbH (MAF)
- Microelectronic Packaging Dresden GmbH (MPD)

Die Aktiv Sensor GmbH ist renommierter Fertiger und Entwickler piezoresistiver Drucksensoren. In enger Zusammenarbeit mit diesem Partner erfolgte die Auswahl und Anpassung der Sensoren für die Anwendung im Autositz. Die in den Funktionsmustern eingesetzten Kraftsensoren wurden von Aktiv Sensor gefertigt.

X-FAB Semiconductor Foundries gehört zu den weltweit führenden Foundry-Gruppen für gemischt analog-digitale Anwendungen. GEMAC hat langjährige Erfahrungen mit den Technologien und Prozessen von X-FAB. Nahezu alle im Haus entwickelten ASICs werden von X-FAB an verschiedenen Standorten gefertigt.
Die Fertigung der integrierten Sensorelektronik (Waferfertigung) erfolgte ebenfalls bei X-FAB in Erfurt.

Microelectronic Assembly Frankfurt (Oder) GmbH (MAF) und Microelectronic Packaging Dresden GmbH (MPD) sind beides Dienstleister auf dem Gebiet des Häusens von ASICs und Sensoren. Die schwerpunktmäßige Ausrichtung von MAF liegt bei Plastgehäusen (Mold-Prozeß) während MPD vorrangig Musteraufbauten in Keramikgehäuse fertigt. Die Aufbauten im QFN 32 wurden von MAF gefertigt während die Testexemplare im CLDCCJ 44 bei MPD gehäust wurden.

6. Wissenschaftlich – technische Ergebnisse

6.1. Anforderungsmatrix

Unter Federführung von AUDI wurde mit Arbeitspaket 1 eine Anforderungsmatrix an das Sensorsystem im Sitz erstellt. Diese enthält in tabellarischer Form alle wichtigen Standards, Systemkomponenten, die Anforderungen daran sowie die daraus resultierenden Aufgaben für die einzelnen Projektpartner. Festgelegt sind darin die

- Art, Wirkprinzip und Anzahl der Sensoren,
- deren Anordnung und Integration ins Textil
- die Verbindungstechnik und Integration ins Textil
- elektronische Signalverarbeitung
- Druckbereich und Auflösung
- Umgebungsbedingungen
- Energieversorgung / Stromverbrauch
- Integration des Systems in den Sitz
- erforderliche Prüfungen und Zertifikate
- Kriterien für Klassifizierung

6.2. Sensorauswahl

Parallel zur Erstellung der Anforderungsmatrix wurden im Arbeitspaket 2 Sensortypen nach ihrer Eignung für die Messung der Sitzbelegung im Fahrzeug untersucht. Die Entwicklung eines völlig neuen Sensorelementes war aus Kosten- und Zeitgründen innerhalb des Projektes nicht geplant.
Bei der Auswahl der möglichen Sensoren galt es vor allem, die kraftfahrzeugspezifischen Bedingungen sowie die aus dem vorgesehenen Einbau in den Fahrzeugsitz resultierenden Einflüsse zu beachten. Dazu zählen insbesondere Temperatur (Außentemperatur, Klimaanlage, Sitzheizung,...) sowie die im Falle von Drucksensoren zu beachtende Abhängigkeit von aktueller Höhenlage oder Einwirkungsrichtung der Kraft. Nicht zuletzt muß das Sensorsystem mechanisch robust aufgebaut sein. Dazu mußte auf die Eignung des Mikrosystems aus Sensorelement und Sensorelektronik zur Einbettung in ein entsprechendes Druckübertragungsmedium geachtet werden. Natürlich bestanden auch auf Grund des vorgesehenen Einsatzes in Serienfahrzeugen entsprechende preisliche Restriktionen. Unter den genannten Bedingungen erwiesen sich drei Sensortypen als besonders geeignet. Dies waren

- der mikromechanische Drucksensor,
- der sogenannte Biegebalken und
- der Dehnungsfaden.

Zur Minderung des technischen Projektrisikos, insbesondere hinsichtlich der Entwicklung des Sensorsystems aus Sensorelement und Sensorelektronik, sollten ursprünglich zwei alternative Sensoren mit unterschiedlichen Meßprinzipien ausgewählt und in Arbeitspaket 5 weiter bearbeitet werden. Da es zu diesem Zeitpunkt sehr schwierig war, zwischen den Vor- und Nachteilen der einzelnen Varianten abzuwägen, wurden alle drei Varianten zum Einbau in den Sitz vorangetrieben. Die Arbeiten zum Dehnungsfaden wurden vorrangig von TITV, die zum Biegebalken von Würth Elektronik und die zum mikromechanischen Sensor von GEMAC weiter bearbeitet.

6.3. Integrierte Sensorelektronik

6.3.1. Konzeption

Die von den einzelnen in der Sitzfläche angeordneten Sensorelementen gelieferten Ausgangssignale müssen zunächst aufbereitet, dezentral und sensornah in eine für die weitere digitale Signalverarbeitung geeignete Form gewandelt werden. Dies ist auch notwendig, um mögliche Beeinflussungen der Meßergebnisse durch externe Störungen weitgehend ausschließen zu können. Direktes Anbinden aller Sensorsignale an eine zentrale Auswerteelektronik ohne Vorverarbeitung führt auf Grund des vorhandenen Störspektrums zu Fehlmessungen und Ausfällen.

Die Auswerteelektronik wurde so konzipiert, daß sie für alle drei Sensortypen (Biegebalken, Kraftsensor und Dehnungsfaden) genutzt werden kann. Um den Verdrahtungsaufwand gering zu halten, wurde eine busartige Anbindung der einzelnen Sensor-ASIC-Module gewählt. Nachteilig bei Bussystemen ist jedoch, daß ein Teilnehmer im Störungsfall den Bus blockieren kann und so das gesamte System ausfällt. Durch zusätzliche Schaltungsmaßnahmen im ASIC und der zentralen Auswerteelektronik konnte dieses Problem aber weitgehend beseitigt werden. Abb. 1 zeigt das Blockschaltbild der Sensor-Auswerteelektronik. Die schwarz dargestellten Pins werden in der Anwendung Sitzbelegung mit der gestickten Sensormatte verbunden. Der Schaltkreis verfügt weiter über zusätzliche Testpins, auch die Ausgabe der analogen Meßsignale (OUT_A) ist möglich. Im folgenden wird kurz auf die wichtigsten Schaltungsblöcke eingegangen.

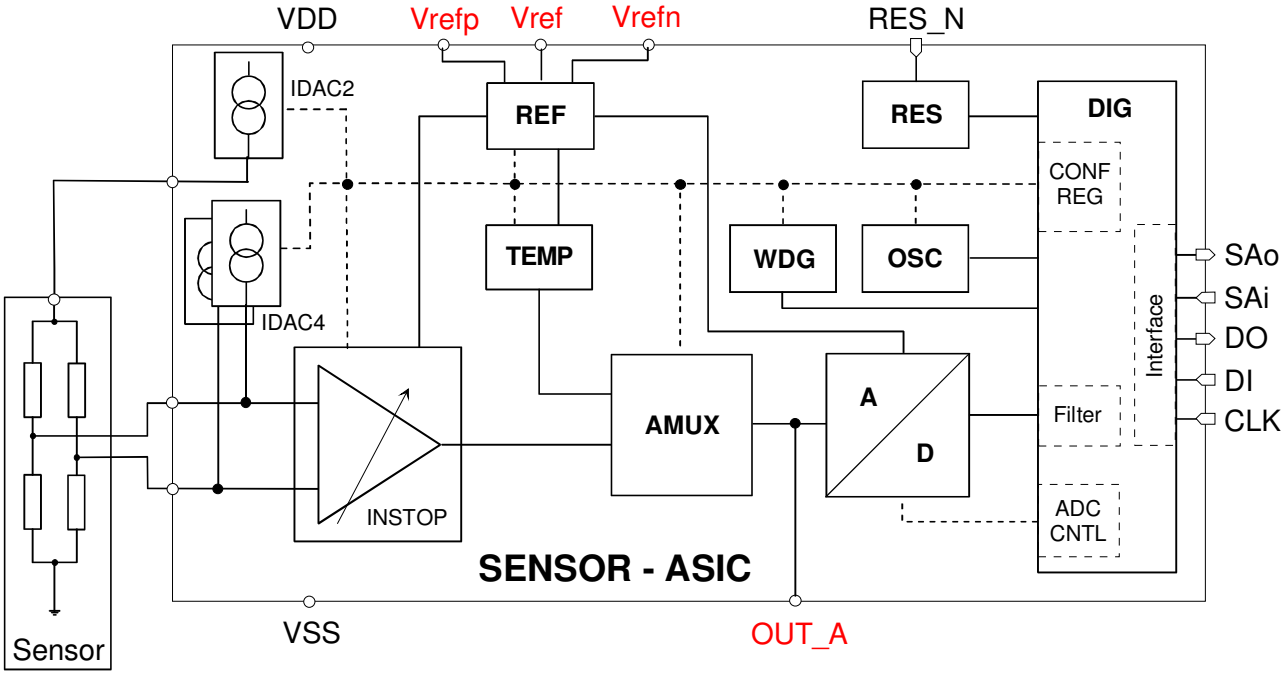

Abb. 1: Blockschaltbild ASIC

6.3.1.1 Instrumentationsverstärker (INSTOP)

Der Biegebalken wie auch der Kraftsensor stellen schaltungstechnisch eine Brückenschaltung dar. Die Brückenspannung wird vom Instrumentationsverstärker verstärkt. Durch die sensornahe Anbindung ist diese nur wenig durch Störsignale überlagert. Die Verstärkung ist digital einstellbar. Dadurch kann der optimale Arbeitspunkt für jedes Sensorelement eingestellt werden, auch der Anschluß verschiedener Sensoren ist möglich. Gespeist wird der Sensor durch einen programmierbaren Konstantstrom (IDAC2). Damit ist die Sensor-Brückenspannung weitgehend versorgungsspannungsunabhängig. Durch weitere einstellbare Stromquellen ist auch der Offsetfehler von Sensor und Verstärker kompensierbar.

Das Meßprinzip des Dehnungsfadens beruht auf einer einfachen Widerstandsänderung. Bei dieser Anwendung wird der Dehnungsfaden ebenfalls mit einem digital konfigurierbaren Konstantstrom gespeist und der Spannungsabfall über den Faden gemessen. Dieser ist proportional dem Widerstand und der durch die Belastung hervorgerufenen Dehnung. Dieses Signal muß nicht erst verstärkt werden und gelangt deshalb direkt auf den ADC.

6.3.1.2 Spannungsreferenzen (REF)

Dieser Block generiert die zur Messung notwendigen Bezugspotentiale. Diese werden aus einer Bandgap abgeleitet, so daß sie nahezu unabhängig von Temperatur- und Betriebsspannungsschwankungen sind. Die Referenzen stehen auch extern an Pins zur Verfügung.

6.3.1.3 Temperaturmessung (TEMP)

Diese Zelle generiert eine der Chiptemperatur proportionale Spannung. Durch die Temperaturabhängigkeit der Sensoren und den großen Umgebungstemperaturbereich von -40 … +85°C (Sitzheizung, Sonneneinstrahlung, usw.) wird dieser Wert zur Korrektur der Meßgrößen benötigt. Im ASIC selbst ist keine Temperaturkompensation implementiert. Die Temperatur wird an die übergeordnete Auswertung übermittelt. Damit ist diesbezüglich ein Höchstmaß an Flexibilität gewährleistet.

6.3.1.4 Analog - Digital Converter (A/D)

Zur Digitalisierung der Meßwerte wurde ein 8-Bit-SAR-Analog-Digital-Wandler implementiert. Dieser stellt einen Kompromiß zwischen Auflösung, Umsetzungsrate, Flächenbedarf und Energieverbrauch dar. Durch einen Analogmultiplexer (AMUX) erfolgt die Auswahl zwischen den Sensormeßwerten, der Temperatur und internen Testsignalen.

6.3.1.5 Digitalteil (DIG)

Wie aus dem Blockschaltbild in Abb. 1 ersichtlich ist, hat der Digitalteil mehrere Funktionen. Er enthält unter anderem eine Ablaufsteuerung für unterschiedliche, konfigurierbare Meßzyklen, eine Registerbank mit den Konfigurationseinstellungen und ein serielles Interface (SPI) zur Kommunikation mit der zentralen Steuer- und Auswerteeinheit (z.B. Bordcomputer). Die SPI Zugriffe erfolgen generell über die Register, in denen auch die Meßwerte abgelegt werden.

Adresse	Name	Zugriff	Beschreibung	
0x0	VERS	R	Konfiguration	ASIC Hardware Revision
0x1	ADDR	(R)/W		Adress Register
0x2	TEST	R/W		SPI Test Register
0x3	OSC	W		Enable Oszillator / Watchdog, Einstellung Systemtakt
0x4	INSTOP	W		Enable + Verstärkung Instrumentationsverstärker
0x5	REF	W		Einstellung / Abgleich der Referenzen
0x6	IDAC2	W		Enable + Einstellung Konstantstromquelle IDAC2
0x7	IDAC4	W		Enable + Einstellung Konstantstromquelle IDAC4
0x8	STAT	R		Status Register
0x9	ADDR	(R)/W	Meßwerte	Adress Register
0xA	ADCM	W		ADC Mode Register
0xB	AMUX	W		AMUX Register, Auswahl Meßsignal
0xC	ADC0	R		ADC Meßwert 0 Meßbrücke (Kraftsensor / Biegebalken)
0xD	ADC1	R		ADC Meßwert 1 RM1 (Dehnungsfaden)
0xE	ADC2	R		ADC Meßwert 2 RM2 (Dehnungsfaden)
0xF	ADC3	R		ADC Meßwert 3 Chiptemperatur ASIC

Tabelle 1: Registerbelegung (R= Lesezugriff, W= Schreibzugriff)

Tabelle 1 zeigt auch die Flexibilität des ASICs für Anwendungen Ohmscher Sensoren. Bis zu 15 ASICs können an einem seriellen Interface betrieben werden. Die Adresse 0 gilt als „Broadcast“ für alle Busteilnehmer und wird nicht vergeben. Um das Interface nicht unnötig zu belasten und damit das ausgehende elektromagnetische Störfeld gering zu halten, sind neben den Einzelmessungen verschiedene automatische Meßzyklen einstellbar, wie z.B. die ständige Sensormessung mit Mittelwertbildung oder eine ständig wechselnde Messung des Sensorsignals und der Temperatur. Um den Energieverbrauch gering zu halten, können die Schaltkreise zwischen den Messungen auch in den Ruhezustand versetzt werden.

Für die Auswertung der Sitzbelegung ist es erforderlich, den Meßwerten der einzelnen Sensoren eine definierte Position auf dem Sitz zuzuordnen. Dies ist z.B. durch

- Programmierung der ASICs (setzt nichtflüchtige Speicherzelle voraus),
- Verdrahtung (zusätzliche Select – Leitungen) oder
- Programmierung der Sensor-ASIC Leiterplatten

möglich. Diese Varianten erfordern jedoch zusätzlichen Aufwand bei der Fertigung. Im Projekt wurde eine andere Lösung entwickelt, bei der nach dem Power-On eine Initialisierungsroutine gestartet und jeder Meßstelle eine Adresse zugeordnet wird. Die örtliche Zuordnung der Meßstellen erfolgt dadurch, daß über nur eine Leitung ein Signal von ASIC zu ASIC weitergereicht wird, die das Setzen der auf dem Interface übermittelten Adresse jeweils nur einem ASIC erlaubt.

6.3.1.6 Oszillator (OSC)

Der interne 100kHz RC - Oszillator generiert den Takt für Digitalteil und ADC. Über das Register 0x3 (OSC) kann der interne Takt auf nominal 50kHz bzw. 25kHz eingestellt werden. Da die geforderte Verarbeitungsgeschwindigkeit es ermöglicht, wurde die Frequenz niedrig gewählt, um die elektromagnetische Störabstrahlung und Verlustleistung gering zu halten.

6.3.1.7 Watchdog (WDG)

Ebenfalls über das Konfigurationsregister „OSC“ (Adresse 0x3) kann die Funktion dieses Blocks aktiviert werden. Durch das hohe Störspektrum im Kfz besteht die Gefahr, daß auf das Interface Spikes eingekoppelt werden und die Kommunikation dadurch zusammenbricht. Die Funktion von Watchdog ist relativ einfach, aber sehr wirkungsvoll. Innerhalb einer vorgegebenen Zeit muß der ASIC erneut über das Interface angesprochen werden. Erfolgt dies nicht, wird die Schnittstelle intern zurückgesetzt. Anders als bei einem Reset bleibt die Initialisierung dabei erhalten. Dadurch kann zwar ein Telegramm verlorengehen, die Kommunikation funktioniert aber wieder. Eine potentielle Quelle für solche Störsignale ist die Sitzheizung, die sich großflächig in unmittelbarer Nähe zur Sensormatte befindet. Die Regelung der Sitzheizung erfolgt durch Pulsweitenmodulation. Das heißt, ein relativ starker Verbraucher wird ständig zu- und abgeschaltet.

6.3.1.8 Power On Reset (POR)

Mit dem Zuschalten der Betriebsspannung erfolgt ein Rücksetzen des Digitalteils. Damit wird er in einen definierten Ausgangszustand versetzt. Für Testzwecke kann diese Funktion auch extern ausgelöst werden.

6.3.2. <u>ASIC Design</u>

Wie bereits erwähnt, wurde zu Projektbeginn die Technologie XC06 von der XFAB favorisiert. Alle Schaltungsstrukturen wurden für diese Technologie, die Mindeststrukturbreiten von 0,6µm zuläßt, entwickelt. Mit Serienüberleitung ist ein weiteres Redesign geplant. Der Focus liegt dann auf einer Optimierung des ASICs für das entsprechende Sensorelement zu Lasten der Flexibilität, um die Serienkosten weiter zu senken. Ob im Rahmen der Industrialisierungsphase gegebenenfalls auf eine Technologie mit geringeren Strukturbreiten übergegangen wird, muß zu diesem Zeitpunkt entschieden werden. Mit Entwicklungsbeginn der integrierten Sensorelektronik war die XC06 auf Grund des guten Preis-Leistungs-Verhältnisses und ihrer Robustheit die beste Wahl.

Entsprechend der Konzeption und dem zu Entwicklungsbeginn vorhandenen Wissen über Sensorparameter erfolgte die Zellentwicklung. Das Entwurfsrisiko wurde durch die Programmierbarkeit der wichtigsten Parameter minimiert.
Das Vorgehen bei der ASIC-Entwicklung entsprach dem sogenannten Top-Down-Entwurf. Ausgehend von der Konzeption wurde eine Gesamtschaltung entwickelt, die alle Zellen und Parameter enthält. Diese Zellen wurden dann mit Schaltungen auf Basis primitiver Elemente (Transistoren, Widerstände,…) unterlegt und unter verschiedenen Umgebungs- (Temperatur, Versorgungsspannung) und Prozeßbedingungen (zulässige Prozeßabweichung) solange simuliert und optimiert, bis die Zielparameter erreicht waren. Darauf aufbauend wurde die gesamte Schaltung simuliert, jedoch auf Grund der Komplexität nur unter ausgewählten Bedingungen.
Mit geringem Zeitversatz erfolgten parallel die Layoutentwicklung der Zellen und die der Gesamtschaltung. Bei kritischen Schaltungsteilen wurden Netzlisten mit parasitären Elementen aus dem Layout extrahiert und diese erneut simuliert. Mit diesen Ergebnissen konnten gezielt Dimensionierungen angepaßt und das Layout verbessert werden.

Vor der Datenüberleitung wurde das Gesamtlayout noch Tests unterzogen. Dies waren der DRC (**D**esign **R**ule Check) und der LVS (**L**ayout **V**ersus **S**chematic). Beim DRC wird überprüft, ob alle Regeln eingehalten wurden. Dies sind im wesentlichen Abmessungen und Abstände von Flächen oder Polygonen eines Layers zueinander bzw. zu denen anderer Layer. Die zweite wichtige Überprüfung LVS vergleicht die entwickelte elektrische Schaltung (Schematic) mit dem tatsächlichen Layout. Die Datenüberleitung zum Hersteller erfolgte, nachdem alle Differenzen dieser Tests beseitigt waren.
Abbildung 2 zeigt das vollständige Layout des ASICs. Der ASIC hat 24 Pads und eine Größe von ca. 2,3 x 2 mm.

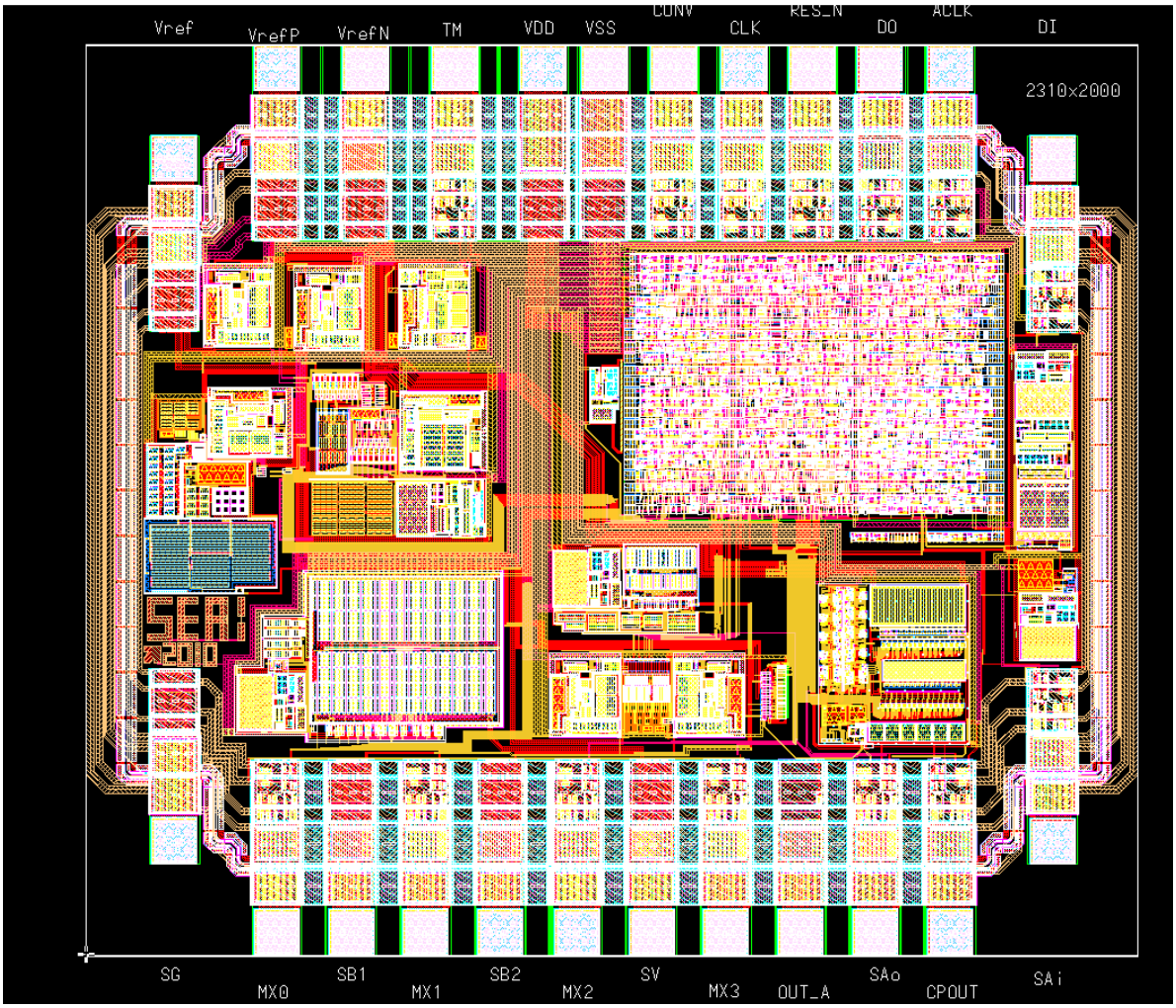

Abb. 2: ASIC- Layout

6.4. Präparation und Test (AP4)

6.4.1. Präparation

In der Zeit von Oktober bis Dezember 2009 wurden die Wafer im Rahmen eines MLM-Runs (Multi Level Mask) bei XFAB in Erfurt gefertigt. Um genügend Muster auch für die Sitzaufbauten zu haben, wurde diese Art des Engineering Runs gewählt. Anschließend wurden für Testzwecke Muster im Keramikgehäuse CLDCCJ 44 aufgebaut. Mitte Januar 2010 konnte dann mit dem Test begonnen werden. Mit dem

Vorliegen positiver Ergebnisse wurde das Häusen von ASICs ins Zielgehäuse, einem QFN32 (Quad Flat Non-leaded), beauftragt, so daß die ersten Originalschaltkreise Mitte April 2010 verfügbar waren. Der Vorteil dieses Gehäuses besteht in der geringen Größe von nur 5 x 5 x 0,9 mm. Eine möglichst kleine Größe und Dicke der Sensoren und der Auswerteelektronik im Sitz ist sehr wichtig, da der Sitzkomfort nicht beeinträchtigt werden darf.

6.4.2. Meßergebnisse

Die Bestimmung der Parameter der einzelnen Schaltungsblöcke sowie die Überprüfung der Funktion der Gesamtschaltung erfolgte mit Labormeßtechnik und der speziell dazu entwickelten Testleiterplatte (siehe Abb. 3). Im Ergebnis der Tests konnte die Funktionsfähigkeit des ASIC nachgewiesen werden. Begonnen wurde mit Aufnahme der Verlustleistung und schrittweiser Inbetriebnahme bzw. Test der einzelnen Schaltungskomplexe (Power-On-Reset-Zelle, Oszillator, serielles Interface, ...). Das Interface besitzt eine zentrale Funktion, da hierüber alle Einstellungen im ASIC erfolgen. Über Testpins ist jedoch auch ein abgerüsteter Betrieb möglich.

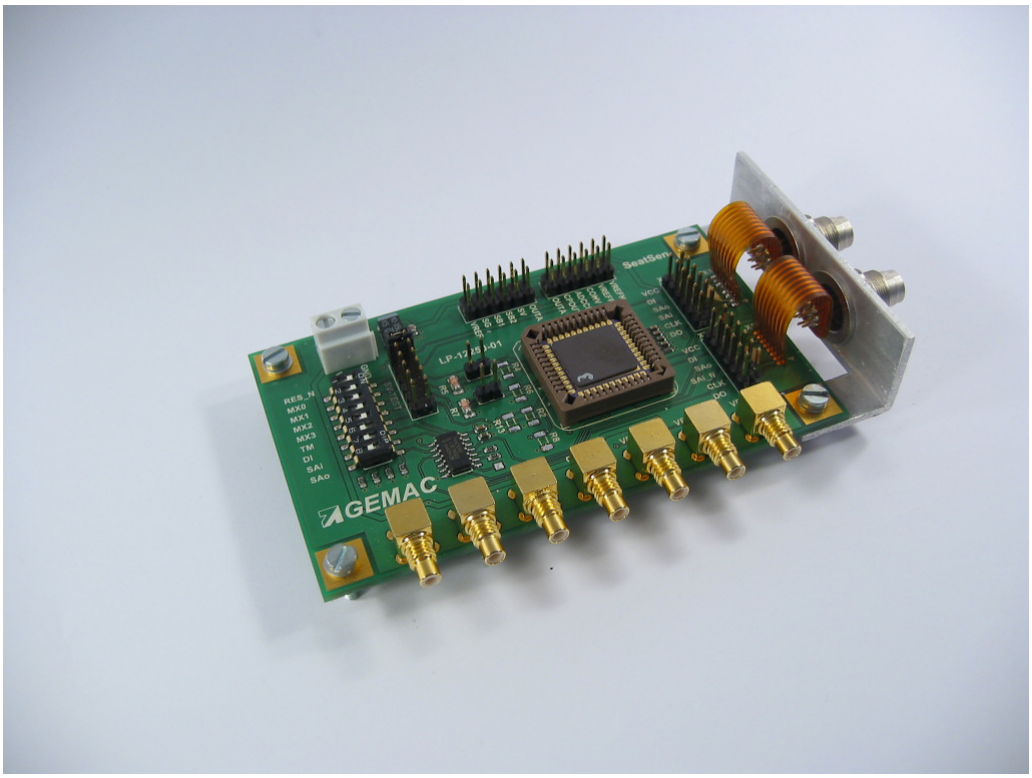

Abb. 3: Testleiterplatte

Nachfolgend sind einige wichtige Ergebnisse aufgeführt.

Kraftsensor und Biegebalken stellen schaltungstechnisch eine Brückenschaltung dar. Wie in Abschnitt 6.3.1.1 erwähnt, wird diese wegen der notwendigen Flexibilität von einer programmierbaren Stromquelle gespeist. Abbildung 4 zeigt die zu den entsprechenden Einstellungen gehörenden Ausgangsströme als Beispiel im Mode 0 (Kraftsensor).

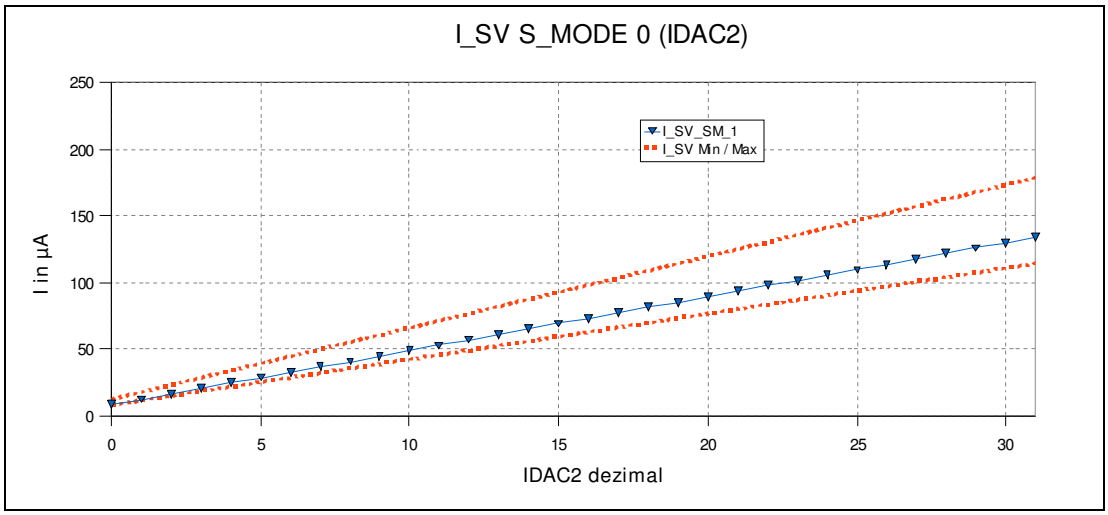

Abb. 4: Kennlinie Konstantstromquelle IDAC2

Die roten Linien begrenzen den nach der Worst-Case-Simulation möglichen Bereich.

Als Verstärker für die Sensor-Brückenspannung wurde wegen des erforderlichen Gleichtakt-Aussteuerbereichs (CMR) ein Instrumentationsverstärker implementiert, der an die konkreten Anforderungen angepaßt wurde und aus nur zwei Operationsverstärkern besteht. Dadurch erhöht sich theoretisch der mögliche Offsetfehler, der aber mit maximal gemessenen 2,5mV gering ausfällt. Wie erwähnt, ist dieser zusammen mit dem Sensoroffsetfehler durch die für die Dehnungsfäden vorgesehenen Stromquellen kompensierbar. Die Verstärkung weicht ebenfalls nur sehr gering mit ca. $V_{ist} = V_{soll} - (0{,}025 * V_{soll})$ vom Zielwert ab. Die Begrenzung des CMR tritt deutlich oberhalb der Einsatzfrequenz auf (siehe Abb. 5). Dargestellt ist die Frequenzabhängigkeit bei einer Verstärkung von 11 bzw. 66.

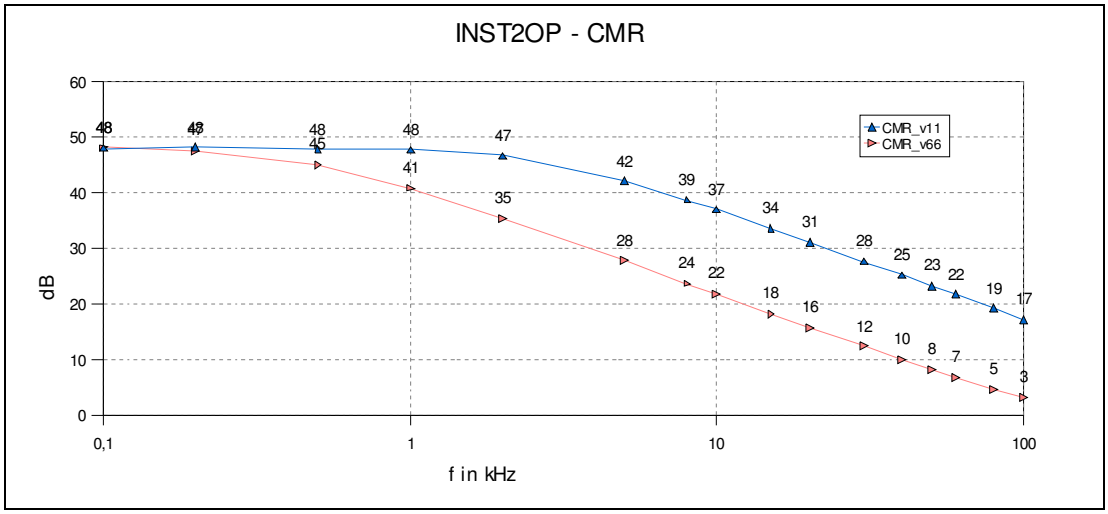

Abb. 5: Frequenzabhängigkeit CMR

Üblicherweise werden Spannungsreferenzen für Wandler extern durch Kondensatoren abgeblockt. Um durch zusätzliche externe Bauelemente den Sitzkomfort nicht zu beeinflussen, wurden die Referenzbuffer so ausgelegt, daß keine Stützkondensatoren erforderlich sind. Die Messung ergab, daß dies ohne Probleme möglich ist. Abb. 6 zeigt die Kennlinie des Analog-Digital-Wandlers.

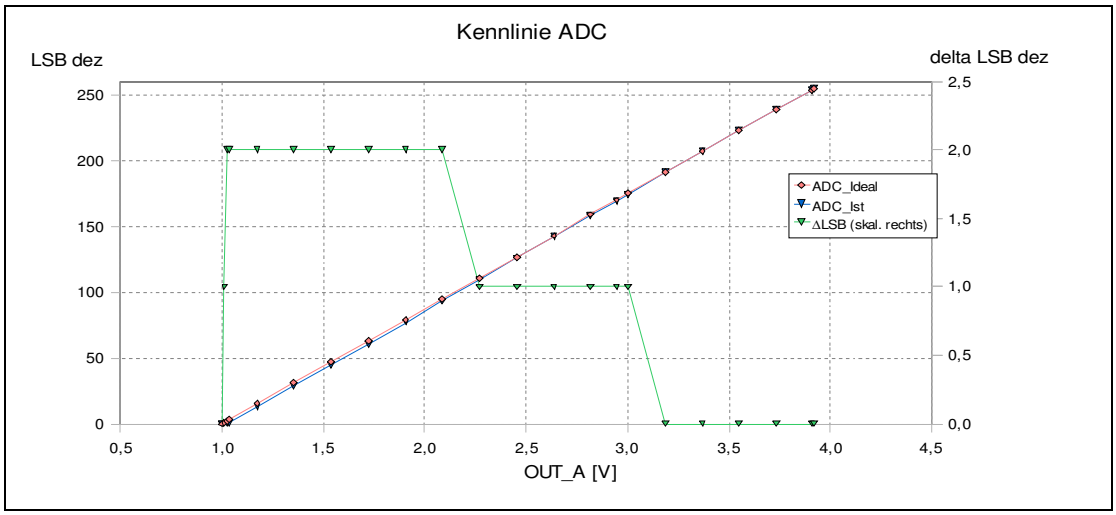

Abb. 6: Kennlinie ADC

Die Abweichung des gewandelten Wertes vom theoretisch ermittelten ist in der Abbildung grün dargestellt. Der ermittelte Fehler beträgt 2 LSB (lowest significant bit) und ist damit für die Anwendung vernachlässigbar.
Die digitalen Werte (Kraft bzw. Dehnung, Temperatur) sind nicht normiert. Teile des Gewichts werden auch vom Sitz direkt aufgenommen, so daß konzeptionsbedingt nur indirekt auf das Gewicht der Person geschlossen werden kann.
Die für den eigentlichen Einsatz vorgesehenen ASICs im QFN32 wurden ebenfalls getestet. Die Parameter entsprachen bis auf wenige defekte Exemplare den Testmustern im CLDCCJ84.

	Stromaufnahme [mA] @5V	***Referenzspannungen (nicht abgeglichen)***			***Temp [LSB] dez***
		VREF [V]	***VREFN [V]***	***VREFP [V]***	
Maximalwert	4	2,500	1,050	4,000	155
Minimal		2,300	0,950	3,850	125
Mittelwert	3,2	2,438	0,986	3,930	139,15
Standardabweichung	0,1	0,025	0,108	0,040	11,79

Tabelle 2: Meßergebnisse (80 Muster)

Als nächster Schritt erfolgte der Test zusammen mit den entsprechenden Sensoren. Als Beispiel ist in Abb. 7 der Testaufbau mit 15 Sensoren inklusive Auswerteelektronik auf einem gemeinsamen Träger dargestellt. Bei den Sensoren handelt es sich um die FLATcomp Sensoren von Würth-Elektronik, die nach dem des Biegebalken-Prinzip arbeiten.

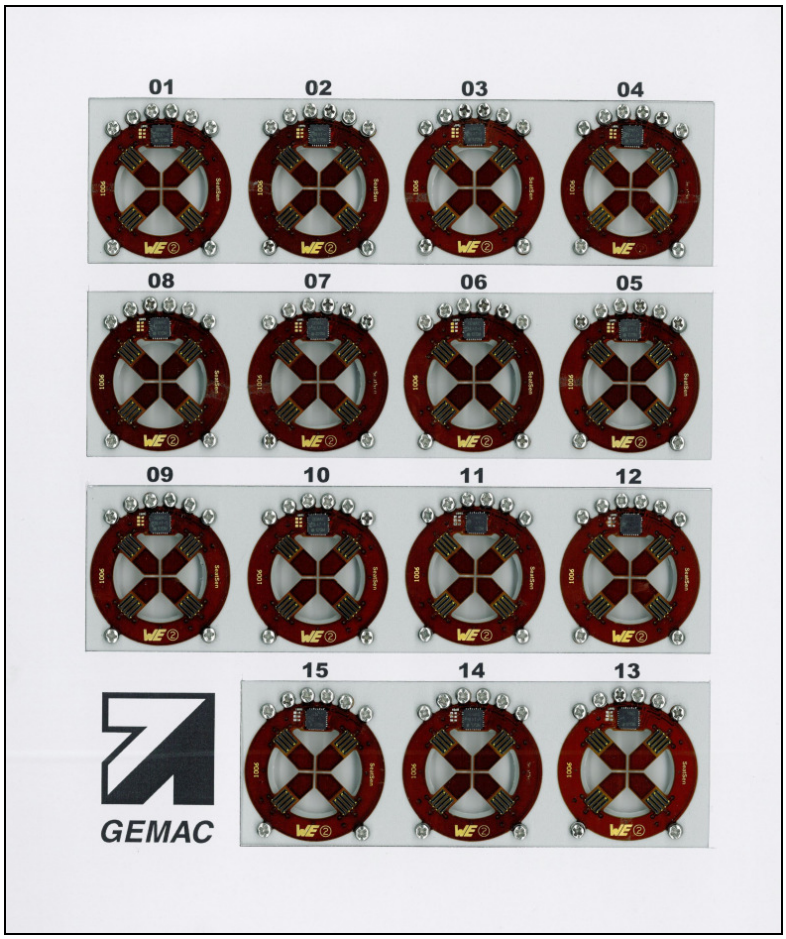

Abb. 7: Testaufbau

Damit wurde das Zusammenspiel aller ASICs auf einem seriellen Interface getestet. Im Gegensatz zum textilen Träger für den Sitz sind hier alle Verbindungen konventionell verdrahtet. Weiter wurden alle an einem Interface möglichen 15 Sensoren ausgewertet. Die Demonstratoren zur Sitzbelegung enthalten neun Sensoren. Das serielle Interface wird über einen Mikrokontroller (AVR) gesteuert. Näheres wird in Abschnitt 6.6.2 erläutert.

6.5. Integration zum Mikrosystem, Optimierung der Sensorelektronik (AP5)

6.5.1. Entwicklung Sensorelement

Der erste Ansatz für den Einsatz von mikromechanischen Sensoren war die Verwendung piezoresistiver Absolut-Drucksensoren der Firma Aktiv Sensor (EPCOS). Diese sollten in kleinen Gel-Kissen (auf Fläche projizierte Größe ca. 70 mm^2) plaziert und im Sitz zwischen Bezug und Schäumling an geeigneten Stellen angebracht werden, um die Meßsignale sensornah aufbereiten zu können.

Aktiv Sensor hatte im Vorfeld für Belastungsanalysen von Schuhen beim Laufen einen interessanten Prototyp entwickelt (siehe Abb. 8). Die Verhältnisse vom Schuh waren jedoch nicht auf den Autositz übertragbar.

Abb. 8: Drucksensor in Schuhsohle, Aktiv Sensor

Für den Einsatz im Fahrzeugsitz muß im Temperaturbereich von -40… +85°C die volle Funktionsfähigkeit gewährleistet sein. Bei der Anordnung der Gel-Kissen unter dem Sitzbezug sind diese auch mechanisch durch spitze Gegenstände gefährdet. Vorteil dieser Variante ist die Lageunabhängigkeit des Sensors in der Gel-Blase und die gute Auflage auf dem Schaumkörper, wodurch auch die Gewichtsbestimmung vereinfacht wird. Dem stehen hauptsächlich folgende Probleme entgegen:

- Gefahr des Auslaufens durch mechanische Beschädigung
- Forderung an annähernd gleiche physikalische Eigenschaften von Gel und Hülle über gesamten Temperaturbereich (-40°C … 85°C)
- unbedenkliche Gel-Inhaltstoffe
- Schwachstelle an Leitungsdurchführung
- Alterungsbeständigkeit des Gel-Kissens

Um die Nachteile des Gels als Kraftübertragungsmedium zu umgehen, wurde ein mikromechanischer piezoresistiver Sensor mit direkter Krafteinkopplung entwickelt. Dies erfolgte als Unterauftrag bei Aktiv Sensor (EPCOS). Als Basis diente das Element eines Drucksensors.

In Abbildung 9 ist dieser Sensor dargestellt. Das Element ist hermetisch dicht, so daß durch eventuell auslaufende Flüssigkeiten die Funktion nicht beeinträchtigt wird. Die Krafteinkopplung auf die Membran des Sensorelementes erfolgt durch eine kleine Kugel. Der Sensor wurde umfangreichen elektrischen und auch mechanischen Tests unterzogen, die sehr positive Ergebnisse zeigten. Vereinzelt aufgetretene Ausfälle waren ausschließlich auf eine unsachgemäße Behandlung zurückzuführen. Auch bei einer punktförmigen Belastung wie beim sogenannten „Knietest“ gab es keine Beanstandungen. Dabei wurde der Sensor in einen Sitz eingebaut und entsprechend Norm zyklisch be- und entlastet. Die Belastung entspricht dem Gewicht einer erwachsenen Person, die sich auf einem Knie dort abstützt.

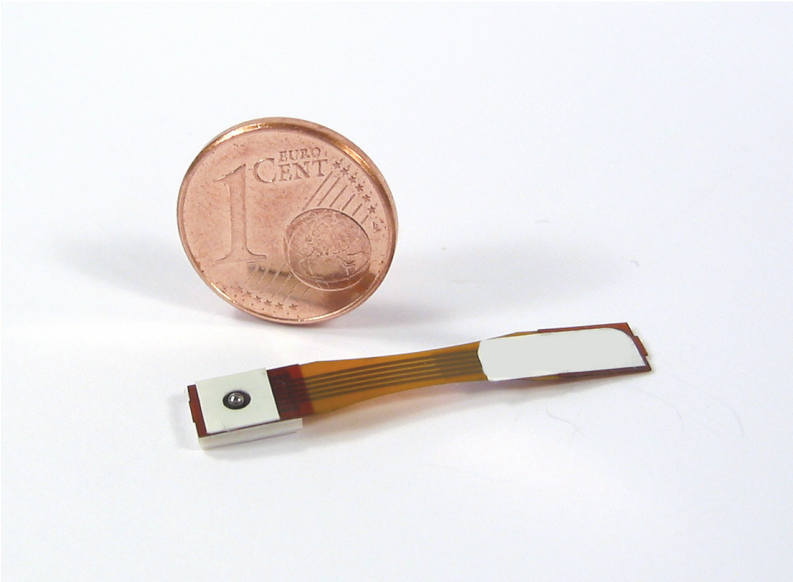

Abbildung 9: Kraftsensor

Mit einer zweiten Sensorpräparation erfolgte die Optimierung des Sensorelementes. Dabei wurden der Meßbereich für die Kraft erhöht, die mechanische Stabilität weiter verbessert sowie die Brückenoffsetspannung reduziert.
Aus Kostengründen und Vereinfachungsgründen ist der Sensor auf einer isolierten Flexplatine plaziert, während für die Auswerteelektronik eine starre zweilagige Leiterplatte verwendet wurde. Für eine spätere Serienfertigung ist an dieser Stelle eine „Starr-Flex“ Platine vorgesehen.

Abbildung 10 zeigt das Sensorelement mit Auswerteelektronik auf der gestickten Sensormatte. Die Plazierung der Sensoren und die elektrische Kontaktierung der Sensor-ASIC-Einheit ist bei Kraftsensor und Biegebalken identisch und wird durch Sticken hergestellt. Auf einer Sensormatte sind insgesamt neun Sensoren angeordnet. Deren Positionen wurden durch Tests ermittelt. Wie in Versuchen nachgewiesen wurde, sind auch Lötverbindungen möglich.

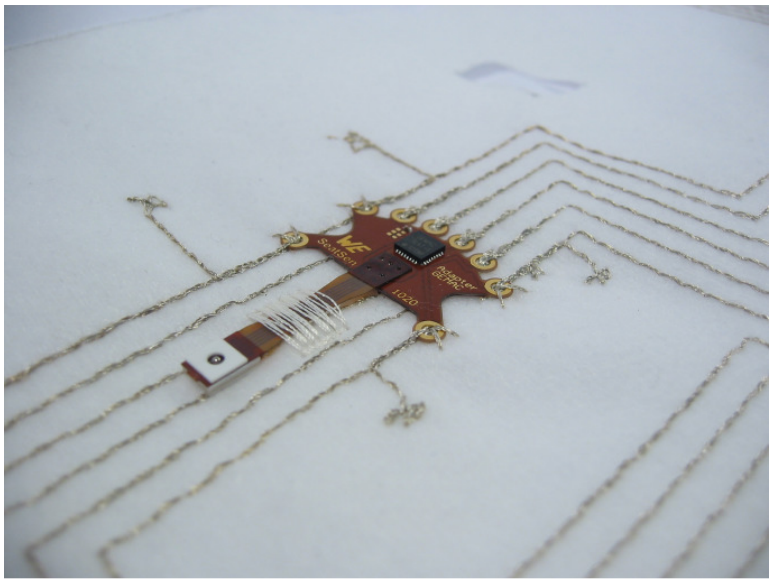

Abb. 10: Kraftsensor mit Auswerteelektronik in textiler Verbindungstechnik

6.5.2. Redesign ASIC

Bei der Entwicklung von analogen oder „Mixed Signal“ ASICs sind stets mehrere Präparationen erforderlich. Der Grund dafür ist, daß aus technischen und zeitlichen Gründen nicht alle Fälle simuliert werden können. Weiterhin sind Ergebnisse aus Präparationen für Optimierungen unbedingt erforderlich.

Die Tests mit den Mustern der ersten Präparation zeigten eine temporär erhöhte Leistungsaufnahme. Der Grund lag in den zusätzlichen Testpins, die im normalen Betriebsmodus abgeschaltet sind. Dies führte zu undefinierten Eingangssignalen und störenden Schwingungen. Durch Änderung einer Metallmaske konnte dieser Fehler behoben werden. Diese Änderung wurde bei den drei, vor dem Prozeßschritt „Poly“ angehaltenen Wafern der ersten Präparation vorgenommen.

Wie bereits erwähnt, wurden mit den ASIC aus der ersten Präparation vollständige Sitzmatten und Sitze aufgebaut und getestet. Bei gemeinsamen Messungen bei CE-LAB an einer Sitzmatte mit Biegebalken wurden sowohl Störeinkopplungen auf die integrierte Sensorelektronik als auch von ihr ausgehende Störstrahlungen untersucht. Die flächenmäßig große Ausdehnung der Verbindungen von Sensor zu Sensor und zur zentralen Auswerteelektronik bildet auch eine entsprechende Antenne. Trotzdem waren die Ergebnisse für die erste Iteration sehr gut. Ab einem gewissen Störpegel bei der Störeinkopplung kam es zu Ausfällen der Kommunikation. Durch Aktivieren der Watchdog - Funktion (siehe 0) konnte dies weitgehend unterdrückt werden. Wegen eines Designfehlers ließ sich diese Funktion allerdings nicht für alle Adressen aktivieren. Im Rahmen des vollständigen Redesigns und der zweiten Präparation wurde dies korrigiert sowie weitere Maßnahmen zur Störfestigkeitserhöhung getroffen. Nunmehr stehen voll funktionsfähige gehäuste ASICs zur Verfügung. Als Gehäuse wurde ein premoulded QFN32 verwendet. Auf Basis dieses ASICs wurden insgesamt drei Sitze aufgebaut und in Betrieb genommen. Die wesentlichste Änderung an diesen Sitzen betrifft die Verbindungstechnik auf der gestickten Sensormatte. Nähere Ausführungen dazu sind im Bericht vom Projektpartner TITV zu finden.

6.6. Integration in den Gesamtaufbau des Sitzes (AP6)

6.6.1. Anordnung der Sensoren

Die Festlegung der Sensoranordnung erfolgte beim TITV. Im Rahmen von gemeinsam durchgeführten Versuchen und Messungen wurden die günstigsten Positionen für die Sensoren im Sitz bestimmt. Dazu stand das „XSENSOR PRESSURE MAPPING SYSTEM“ zur Verfügung. Damit wurden verschiedene Belastungsprofile aufgenommen, wie zum Beispiel

- Belastung durch verschiedene Personen,
- Kindersitz,
- normierte Gesäßschale oder
- Gegenstände.

In Abb. 11 ist als Beispiel die Druckverteilung auf einem Autositz bei einer Belastung durch eine erwachsene männliche Person zu sehen.

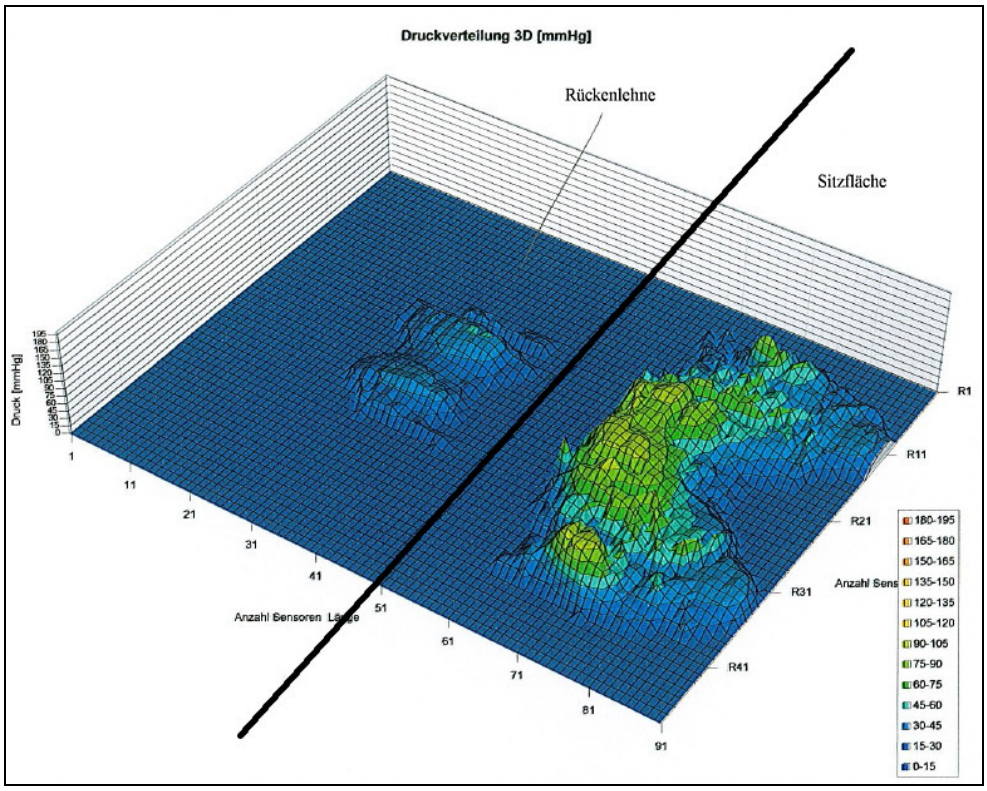

Abb. 11: Druckprofil Autositz bei Belastung durch erwachsene Person

An besonders sensitiven Stellen wurden dann Einzelsensoren (Kraftsensor, Biegebalken) positioniert und die Messungen wiederholt. Wie in Abbildung 12 beispielhaft zu sehen ist, wurden mit drei Sensoren im Sitz mehrere Messungen durchgeführt. Zuerst wurde die Brückenspannung im unbelasteten Zustand aufgenommen, dann bei Belastung durch eine Person usw. Dadurch, daß die Messung über einen längeren Zeitraum durchgeführt wurde, ist der Einfluß der Temperatur (Erwärmung auf annähernd Körpertemperatur) deutlich zu sehen.

Daraus ließ sich unmittelbar die Notwendigkeit einer Temperaturkompensation ableiten. Diese erfolgt durch Software in der Auswerteeinheit. Dazu wird die Temperatur sensornah im ASIC gemessen, digitalisiert und über das serielle Interface ausgegeben.

Bemerkenswert sind auch die Abweichungen der Ergebnisse im wieder unbelasteten Zustand. Dies liegt unter anderem daran, daß der gesamte Sitzaufbau unter mechanischer Spannung steht, da der Sitzbezug mit zusätzlichen inneren Fixierungen auf den Sitz gespannt ist. Durch Be- und Entlastung können sich die Druckverhältnisse in den einzelnen Lagen des Sitzes ändern.

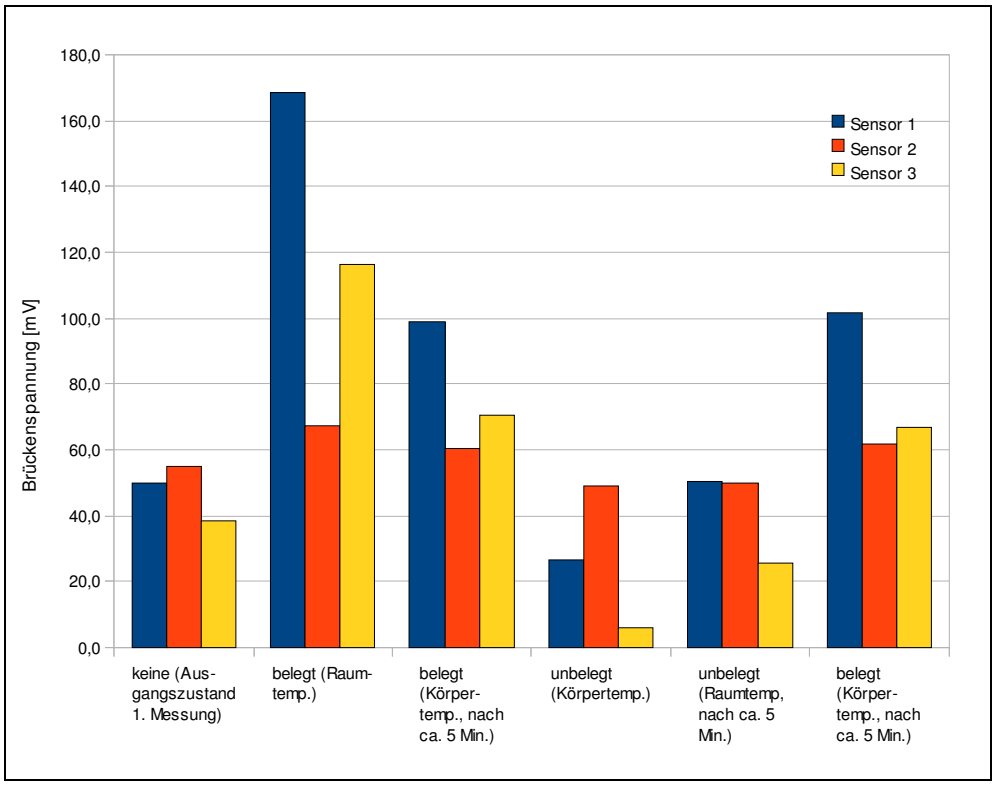

Abb. 12: Meßergebnis Einzelsensoren (Kraftsensor)

Ausgehend von den so ermittelten Positionen wurde von TITV ein textiler Träger mit gestickten Leitungen entwickelt, auf den dann die Sensoren ebenfalls durch Sticken, Löten oder Kleben elektrisch kontaktiert wurden. Auch hier wurden während des Projektes zur Optimierung mehrere Iterationszyklen durchlaufen.

Etwas anders verhält es sich mit den Dehnungsfäden. Diese sind im Schaumkörper des Sitzes angeordnet und benötigen keinen textilen Träger. Die Sensorelektronik ist bei dieser Variante am Rande des Sitzes angeordnet. Weitere Ausführungen dazu sind ebenfalls dem TITV-Bericht zu entnehmen.

6.6.2. Programmier – und Auswerteeinheit

Die Sitzbelegungserkennung besteht bei den Varianten Kraftsensor und Biegebalken aus den Komponenten Sensorelement (9 Stück), ASIC (9), Träger für Sensor und Elektronik (9) und textilem Träger (1). Am Rand des Sitzes befindet sich eine kleine Platine in gleicher Aufbau- und Verbindungstechnik, an die die externe Stromversorgung und das serielle Interface (SPI) angeschlossen werden. Seitens Audi wurden während des Projektes keine Vorgaben über die geplante Art und Weise der weiteren Datenverarbeitung gemacht (z.B. durch Bordcomputer).

Da GEMAC die serielle Schnittstelle im ASIC mit entsprechendem Protokoll realisiert hat, wurde zusätzlich aufbauend auf der Testplatine (siehe Abschnitt 6.4.2) eine für die Qualifizierung der Sitzbelegungserkennung zugeschnittene Programmier- und Auswerteeinheit entwickelt, die in Abbildung 13 dargestellt ist. Sie besteht aus einer Standard-USB-Schnittstelle zum PC und der Ansteuerung für die Sensorelektronik (rechts im Bild). In der dargestellten Ausbaustufe mit vier Kanälen können insgesamt 60 Sensoren angesteuert und ausgewertet werden.

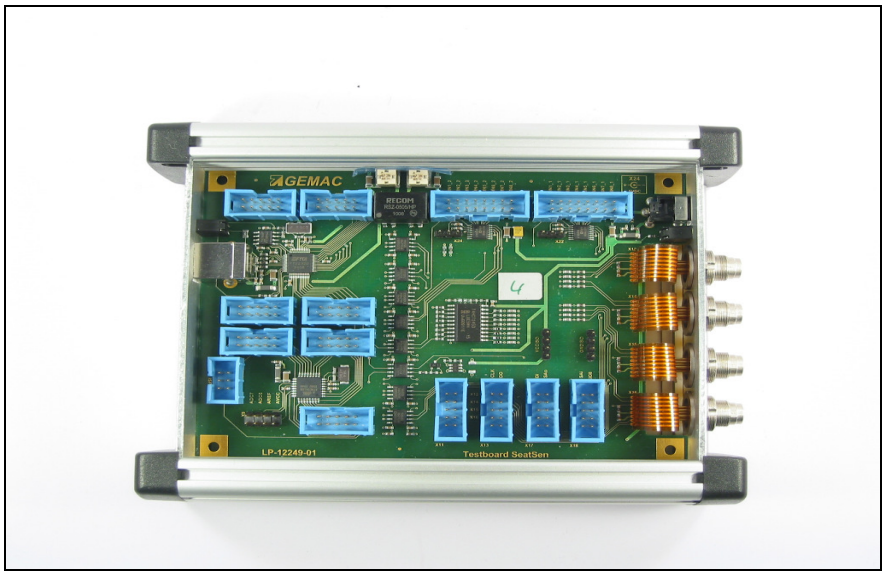

Abb. 13: Programmier- und Auswerteeinheit

Die Verbindung zwischen Standard-USB-Schnittstelle und UART des Mikrocontrollers geht über eine sogenannte USB-zu-seriell-Brücke, wobei diese Brücke in Standardkonfiguration betrieben wird. Dadurch ist keine zusätzliche Programmierung erforderlich.

Der wesentliche Teil der Funktionalität der Einheit wird durch die Software des Mikrocontrollers realisiert. Hierüber erfolgt auch das Zuschalten der Betriebsspannung. Durch die USB - Schnittstelle steht der PC für die Steuerung und Datenauswertung zur Verfügung. Für Tests ist seitens der Sitzbelegungserkennung deshalb keine weitere Technik erforderlich.
Für die einfache Bedienung und Datenauswertung wurde ein spezielles Menü geschaffen. Abbildung 14 zeigt das Menü in Betrieb. Auch eine Variante, die die ungefähre Position der implementierten Sensoren auf dem Sitz darstellt, ist verfügbar. Alle Einstellungen erfolgen über diese Oberfläche. Hier eine kurze Zusammenstellung wesentlicher Funktionen:

- Einstellung serielle Schnittstelle PC
- Power On
- Auswahl Sensortyp
- Konfiguration ASIC (Zugriff auf alle internen Register)
- Einzelmessung
- zyklische Messung

Diese Einstellungen können in einer Datei gespeichert und automatisch mit der Initialisierung geladen werden.

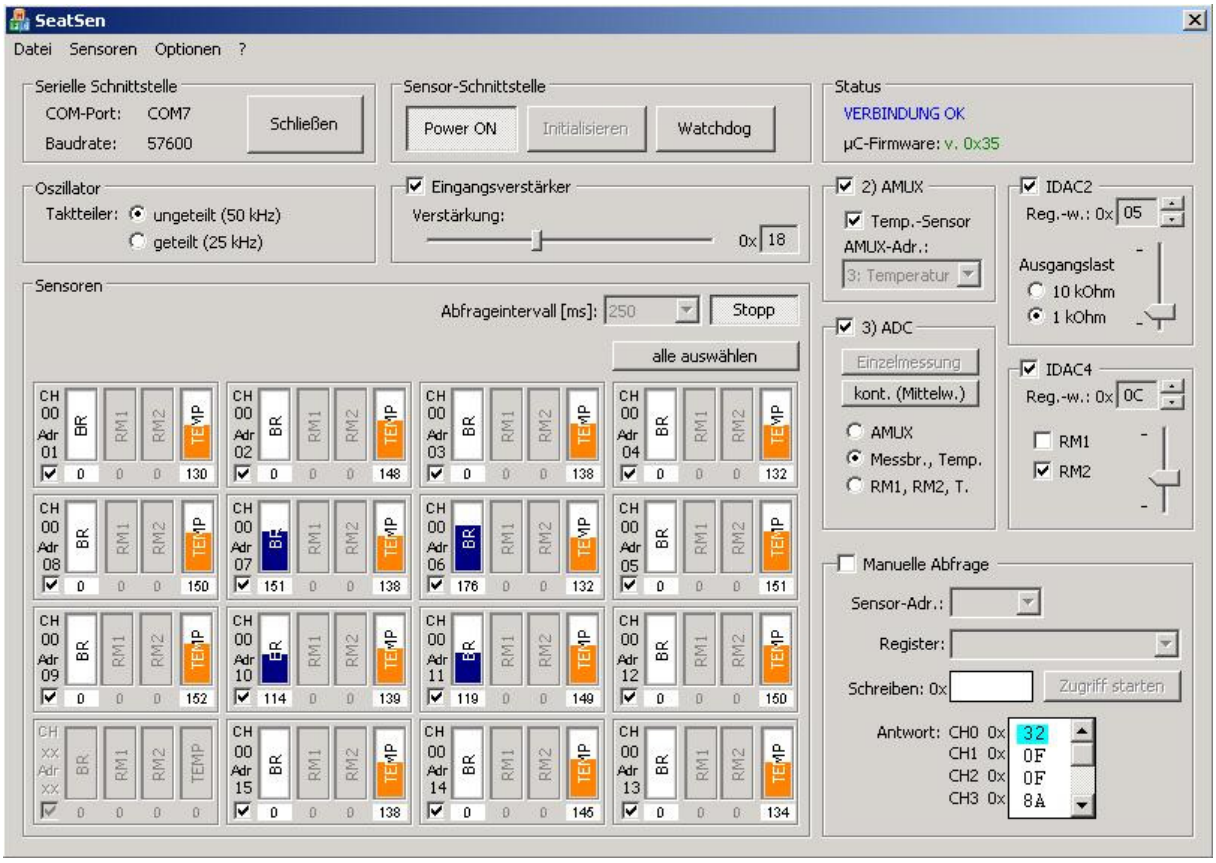

Abbildung 14: PC-Bedien- und Anzeigeoberfläche (Screenshot)

Neben der Anzeige der Meßwerte als Digits ist eine graphische Darstellung in Form von Balkendiagrammen implementiert. Eine Aufzeichnung der Meßwerte ist ebenfalls möglich. Damit ist eine komfortable Testumgebung vorhanden, die für alle Tests und Qualifizierungen genutzt wurde. Im Zuge der Produktentwicklung ist die Implementierung der dann erforderlichen geringeren Funktionalität in eine Auswerteeinheit (Mikrocontroller oder Bordcomputer) vorgesehen.

6.6.3. Aufbau und Test von Labormustern / Sicherung der Zuverlässigkeit (AP7)

6.6.3.1 EMV-Messungen

Die EMV - Untersuchungen wurden bei CE-SYS durchgeführt. Die ersten gemeinsamen Messungen an einer Sensormatte mit neun FLATcomp - Sensoren (Biegebalken) mit Programmier- und Auswerteeinheit zeigten erwartungsgemäß einige Schwachstellen. Dies waren im wesentlichen die zu hohe Störaussendung der Programmier- und Auswerteeinheit und ungenügende Festigkeit der ASICs gegenüber Störeinkopplung. Letzteres konnte durch Aktivierung der Watchdog – Funktion deutlich verbessert werden. Durch eine geringfügige Hardwareänderung in der Programmier- und Auswerteeinheit wurde die zu hohe Störaussendung beseitigt. Weitere Maßnahmen zur Erhöhung der Festigkeit gegenüber HF-Einkopplung wurden im Rahmen des ASIC-Redesigns implementiert.

6.6.3.2 Labormuster

Mit allen Sensortypen wurden mehrere Sitze aufgebaut und neben selbst durchgeführten Tests auch den genormten Tests beim Fahrzeughersteller unterzogen. Die Ergebnisse von den Sitzen mit Sensormatte mit dem Entwicklungsstand vor dem Redesign zeigten sporadische Ausfälle. Diese konnten auf temporäre Kurzschlüsse im textilen Träger der Sitze mit Kraft- bzw. FLATcomp Sensor durch Abrieb von den Filamentfäden zurückgeführt werden.
Im Anschluß wurden daher nochmals zwei Sitze mit verbesserter Aufbau- und Verbindungstechnik aufgebaut. Der dritte Sitz mit Dehnungsfäden wurde ebenfalls überarbeitet. Alle drei sind auf dem aktuellsten Stand inklusive überarbeitetem ASIC.
Nach Endmontage der Sitze wurden alle nochmals getestet und eine Grundeinstellung als Initialisierungsdatei für die Programmier- und Auswerteeinheit erstellt.

Die nachfolgenden Bilder zeigen die Ergebnisse der Einsitzversuche mit den überarbeiteten Sitzen. Die Daten wurden mit der Datenlogger-Funktion der PC-Bedien- und Anzeigesoftware aufgezeichnet. Die Sensoren sind einzeln dargestellt. Der Wertebereich liegt zwischen 0 und 255 für jedes einzelne Element.

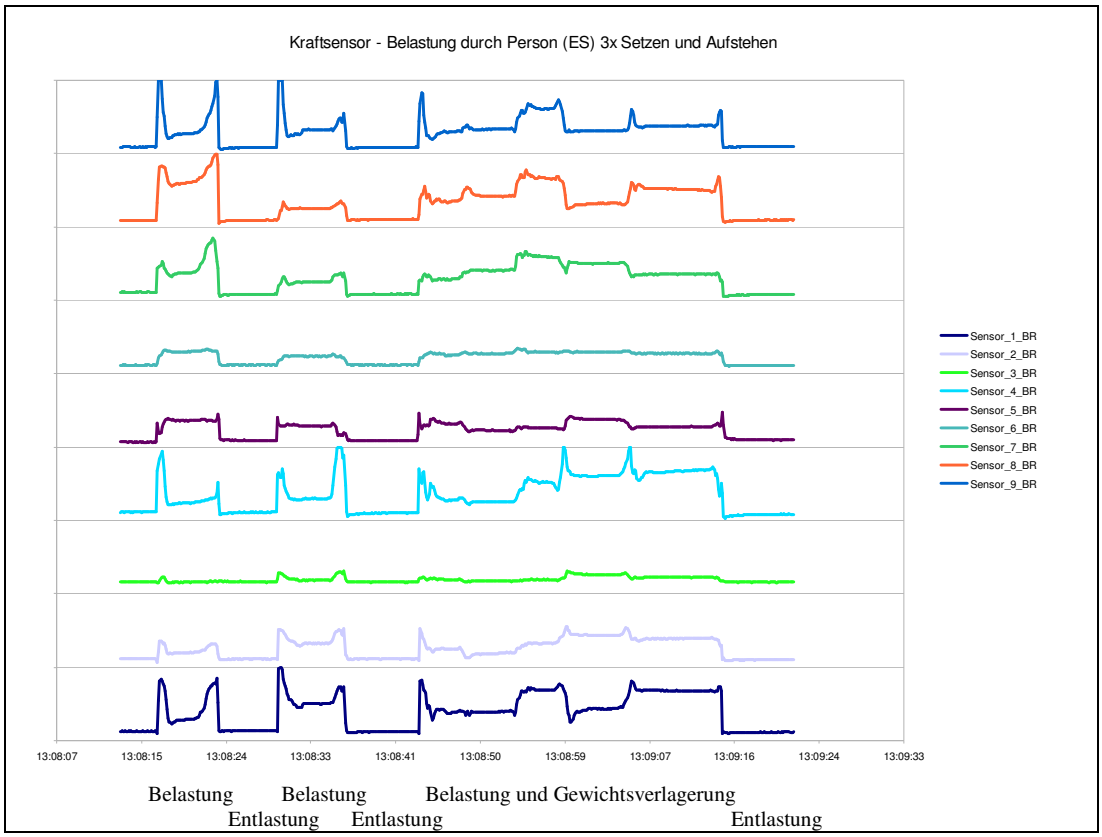

Abb. 15: Test: Sitz mit Kraftsensor

Verglichen mit den beiden anderen Sensortypen, zeigt der Sitzaufbau mit mikromechanischen Kraftsensoren den größten Signalhub und das geringste Rauschen (siehe Abb. 15). Diese Lösungsvariante ist aber auch die aufwendigste.

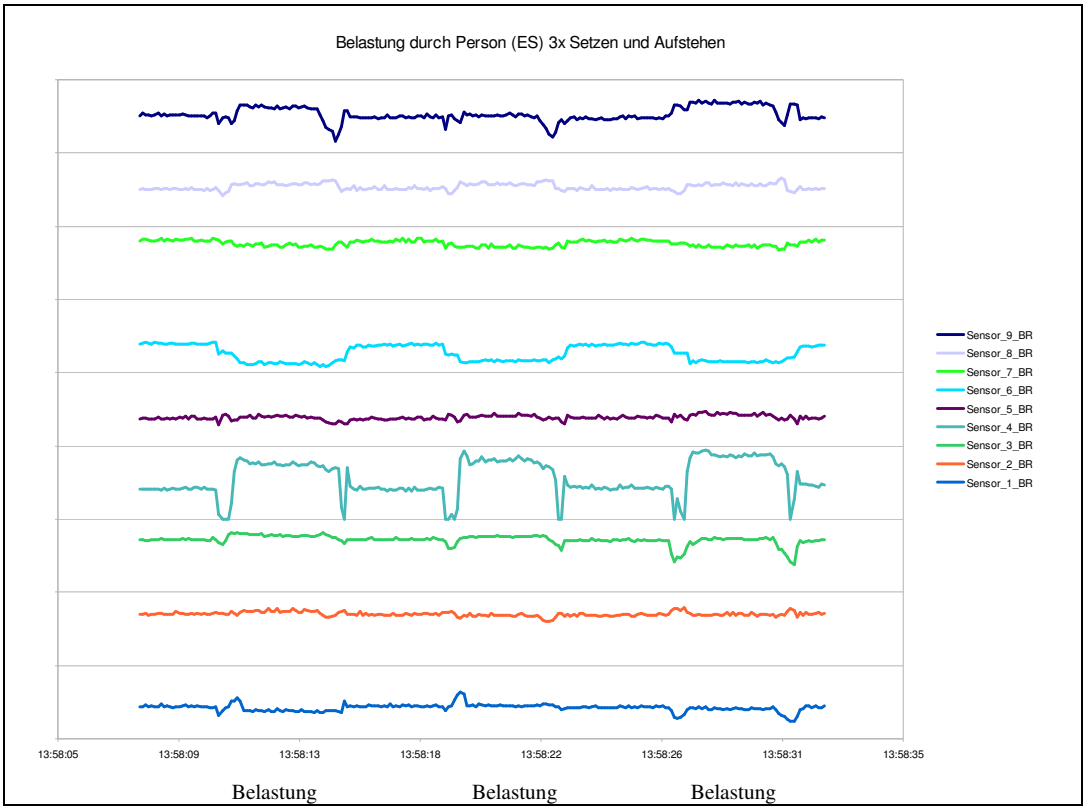

Abbildung 16: Test: Sitz mit Biegebalken (FLATcomp) Sensor

Der Sitz mit dem Biegebalken (siehe Abbildung 16) zeigt einen Effekt sehr deutlich. Je nachdem, an welcher Stelle des Sensors die Kraft einwirkt, kommt es zu einem positiven oder negativen Signalhub. Wirkt die Kraft flächig über den gesamten Sensor, ist der Signalhub gering, da Biegebalken und Rahmen gleichsinnig in den Schaumkörper des Sitzes gedrückt werden. Detaillierte Ausführungen über Aufbau und Wirkungsweise dieses Elementes sind dem Abschlußbericht des Projektpartners Würth Elektronik, der auch dieses Sensorelement entwickelt hat, zu entnehmen.

Beim dritten Sitz ist eine punktuelle Zuordnung der Belastung schwierig, da die Sensorfäden im Schaumkörper des Sitzes gespannt sind. Bei dieser Variante ist eine weitere Zunahme des Rauschanteils zu beobachten, der aber auf Grund des Signalhubs vernachlässigbar ist. Deutlich zu sehen ist die Zeitkonstante, mit der das Signal nach Belastung abklingt.

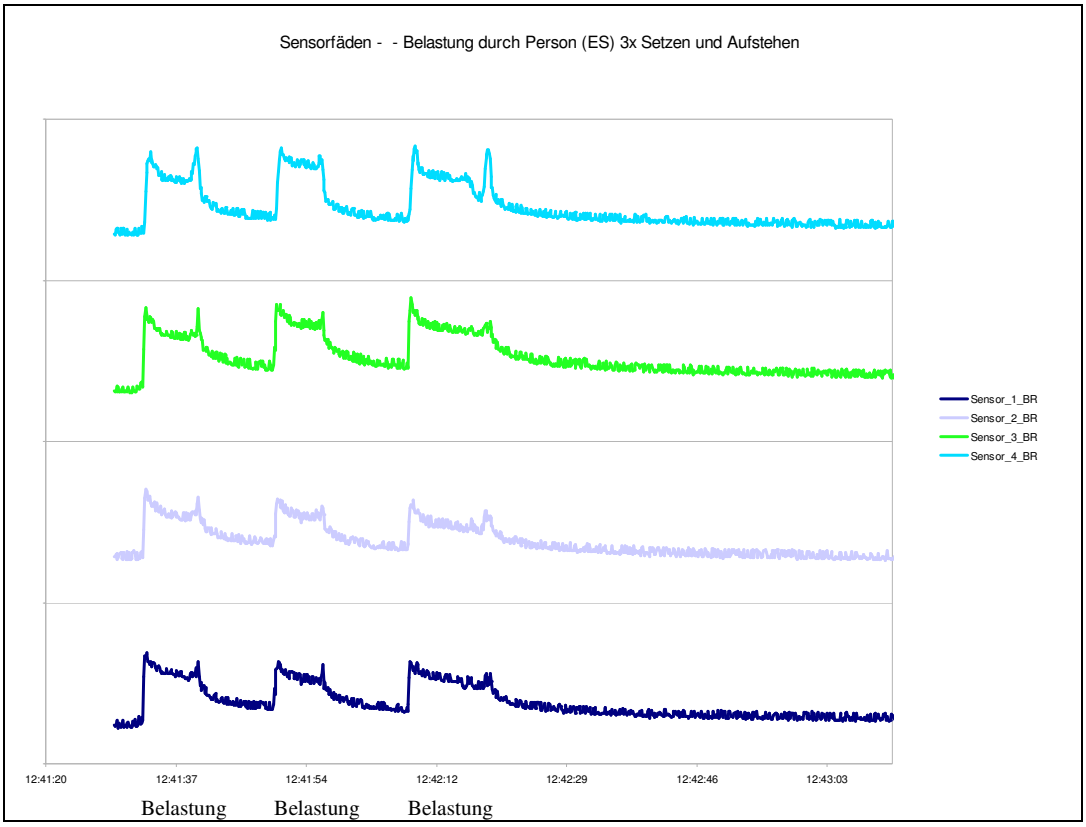

Abb. 17: Test: Sitz mit Dehnungsfäden

Die Einsitzversuche an den Prototypen zeigten, daß alle drei Lösungsvarianten für die Sitzbelegungserkennung geeignet sind. Jede Variante hat ihre Vorteile für entsprechende Anforderungen. Auch die Kombination der verschiedenen Sensorelemente stellt eine weitere interessante Lösung dar. Gegenüber den ersten Sitzaufbauten wurde die Zuverlässigkeit deutlich verbessert.

Die erreichten Ergebnisse gehen über die Ziele des Forschungsvorhabens hinaus. Die technischen Zielstellungen des Verbundprojektes wurden damit vollständig erfüllt.

7. Vergleich des Standes des Vorhabens mit dem ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Finanzierungsplan

Zur Erreichung der Projektziele machte sich gegenüber der ursprünglichen Planung eine Verlängerung des Projektes um insgesamt elf Monate erforderlich. Diese Verlängerung resultierte im wesentlichen aus der Tatsache, daß für alle drei auf textilen Trägern umsetzbare Sensorkonzepte (mikromechanischer Kraftsensor, Biegebalken auf semiflexiblem Substrat, resistive Sensorfäden) die Funktionsfähigkeit experimentell durch Kennlinienaufnahmen nachgewiesen werden mußte. Die Validierung im Sitzaufbau unter praxisnahen Bedingungen war zur Erreichung der Projektziele in Anbetracht der Sicherheitsrelevanz der Sitzbelegungserkennung für alle drei Sensorkonzepte ebenfalls durchzuführen.

Alle drei Varianten waren bis zu einem Entwicklungsstand voranzutreiben, der die spätere industrielle Umsetzung ermöglicht. Damit konnten alle im Projekt vorgesehenen Voraussetzungen für die im Verwertungskonzept geplante

Massenfertigung, die spätestens fünf Jahre nach Projektabschluß beginnen soll, erfüllt werden.

Die Firma GEMAC bearbeitete im Projekt federführend die Entwicklung der integrierten elektronischen Auswertung der Sensorsignale und die Sensorvariante des mikromechanischen Kraftsensors. Die Auswerteelektronik sollte dabei für jeden Sensortyp verwendbar sein. Entwicklungsbedingt lagen jedoch zu einem recht späten Zeitpunkt erst verläßliche Parameter der einzelnen Sensortypen vor, so daß die Präparation der Auswerteelektronik aus Gründen der Risikominimierung nicht zum geplanten Zeitpunkt erfolgte. Ohne die kostenneutrale Verlängerung wäre die geplante Überarbeitung im Rahmen des Projektes nicht mehr möglich gewesen.

Im Ergebnis wurden alle Zielstellungen des FuE-Vorhabens erfüllt, der Kostenrahmen wurde im wesentlichen eingehalten.

8. Nutzung der Projektergebnisse

Die Projektergebnisse werden unmittelbar nach einer sich anschließenden Industrialisierungsphase in den Markt eingeführt. Entsprechend dem Verwertungskonzept bei den Projektpartnern soll die geplante Massenfertigung spätestens fünf Jahre nach Projektabschluß beginnen.

Ein unmittelbarer ökonomischer Effekt ergibt sich für die GEMAC aus dem Verkauf der entwickelten Schaltkreise und Kraftsensoren entsprechend der getroffenen Kooperationsvereinbarung. Bei den von AUDI prognostizierten Jahresstückzahlen wird es möglich, die Projektkosten in einem kurzen Zeitraum zu amortisieren.

Darüber hinaus wird die GEMAC im Rahmen ihrer Marketingaktivitäten die Schaltkreise bzw. Sensoren auch anderen Anwendern zugänglich machen.

Der Schaltkreis ist so gestaltet, daß er auch für ähnliche Sensoranwendungen einsetzbar ist. Darüber hinaus erweitern die im Rahmen des Projektes entwickelten Zellen die im Hause vorhandene Zellbibliothek. Durch ihre Nachnutzung ist es möglich, zukünftig sowohl für eigene Produkte als auch kundenspezifische Anwendungen die Entwurfszeit zu verkürzen, die technischen Parameter zu verbessern und das Entwicklungsrisiko deutlich zu senken. Damit ergeben sich zusätzliche ökonomische Effekte und die Möglichkeit der Erschließung zusätzlicher Anwendungsfelder für die Projektergebnisse.

Dies wird insgesamt dazu beitragen, die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens wesentlich zu verbessern, so daß Arbeitsplätze in den Entwicklungs- und Fertigungsabteilungen der GEMAC gesichert bzw. neue geschaffen werden können und auf diese Weise das kontinuierliche Wachstum der letzten Jahre fortgesetzt werden kann.

9. Fortschritte auf dem Arbeitsgebiet des Vorhabens bei anderen Forschungseinrichtungen und Unternehmen

Während der Projektlaufzeit sind Fortschritte auf dem Gebiet des Verbundvorhabens, die die Ergebnisse relativieren oder die Verwertungsaussichten beeinflussen können, nicht bekannt geworden.

10. Fortführung der Arbeiten

Die Arbeiten an der Sitzbelegungserkennung werden in Abstimmung aller Partner im Rahmen der geplanten Industrialisierungsschritte fortgeführt. Mit den kompletten Sitzen, der Programmier- und Auswerteeinheit und der dazugehörigen PC-Software ist eine komfortable Testumgebung geschaffen worden. Damit können effektiv Untersuchungen in Richtung Serieneinsatz unternommen werden. Diese Tests werden gegenwärtig bei AUDI durchgeführt. GEMAC wird dabei bei Bedarf Unterstützung leisten.

Nach Vorliegen genauerer Spezifikationen sind weitere Schritte in Richtung Serienreife geplant, z.B. die fertigungstechnische Optimierung der Sensoren, Verbesserungen im Layout zur weiteren Verringerung der Chipfläche, aber auch zur Optimierung der Parameter. Je nach Lösungsvariante wird der ASIC dann genau darauf zugeschnitten.

Parallel dazu wird der ASIC weiter qualifiziert, um ihn oder einzelne Zellen davon in weiteren Projekten nutzen zu können. Damit ist insgesamt sowohl die wissenschaftliche als auch die erfolgreiche wirtschaftliche Verwertung der Projektergebnisse gesichert. Die Ergebnisse des Verbundprojektes werden auf dem Vorentwicklungstag der Audi AG im Herbst 2011 präsentiert.

11. Veröffentlichungen

Veröffentlichungen erfolgten hauptsächlich im Rahmen von Präsentationen bei Konferenzen. Nachfolgend eine Auswahl:

- Statusmeetings
- RadioTecC Transmit&Test Solutions 2009
- Technologiekonferenz „elmug4future“ 2010
- mtex Symposium 2010
- SENSOR+TEST Conference 2011