

Abschlussbericht zum Projekt

„Entwicklung eines neuartigen körperschallerzeugenden Crashmanagementsystems zur Verbesserung der Fahrzeuginsassensicherheit“ [aCISS]

der Technischen Hochschule Ingolstadt

Zuwendungsempfänger: Technische Hochschule Ingolstadt
Zentrum für Angewandte Forschung (ZAF)
Esplanade 10
85049 Ingolstadt

Förderprogramm: FHprofUnt 2009

Förderkennzeichen: 1714X09

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Thomas Brandmeier

 0841/9348-7460

 thomas.brandmeier@thi.de

Projektlaufzeit: 01. Juli 2009 – 30. Juni 2013

Kontakt Daten der Projektpartner

Kernpartner



PROCITEC GmbH
Blücherstraße 32
75177 Pforzheim

Ansprechpartner:

Gerd Brandmeier

☎ +49 (0)7231 15561-40

✉ g.brandmeier@procitec.de



Volkswagen AG
Forschung und Entwicklung
Fahrzeugsicherheit EKSE/1
Brieffach 1579
38436 Wolfsburg

Ansprechpartner:

Thorsten Gaas

☎ +49 (0)5361 9-30371

✉ thorsten.gaas@volkswagen.de



Division Chassis & Safety
Business Unit Passive Safety & ADAS
Continental Automotive GmbH
Osterhofenerstraße 19
93055 Regensburg

Ansprechpartner:

Michael Feser

☎ +49 (0)941 790-5299

✉ Michael.Feser@continental-corporation.com



Benteler Automobiltechnik
An der Talle 27 – 31
33102 Paderborn

Ansprechpartner:

Max Niesse

☎ +49 (0)52 5481-3208

✉ max.niesse@benteler.de

Assoziierte Partner



ifak

Ifak
Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg
Steinfeldstr. 3
IGZ Haus 1
39179 Barleben



Audi AG
I/EK-542 Sicherheitsfunktionen
85045 Ingolstadt



Engineering and the Environment
University of Southampton
Highfield
Southampton
SO17 1BJ England



Stangl & Co GmbH
Präzisionstechnik
Werner-von-Braun-Straße 4
D-93426 Roding



PSW automotive engineering GmbH
Carl-Benz-Ring 7
85080 Gaimersheim

A. Inhalt

I Kurzdarstellung	1
1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen	1
2 Planung und Ablauf des Vorhabens	2
2.1 Ziele des Vorhabens.....	2
2.2 Aufteilung der Arbeitspakete.....	3
3 Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn.....	5
3.1 Körperschalltechnologie zur Crasherkenkung.....	6
3.2 Energieabsorption im Fahrzeugcrash: Typschadenelemente.....	7
3.3 Signalverarbeitung der Crasherkenkung	8
4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9
II Eingehende Darstellung	11
5 Wesentliche Ergebnisse des Forschungsprojekts	11
5.1 Soll/Ist – Vergleich	11
5.2 Aufgabenfeld Projektabwicklung (AP0)	16
5.3 Arbeitsbereich Mechanische Realisierung (AP1).....	16
5.4 Arbeitsbereich Codierung und Algorithmik (AP2)	20
5.5 Arbeitsbereich Validierung und Test (AP3).....	24
5.6 Arbeitsbereich Technologietransfer (AP4).....	29
6 Verwertung der Ergebnisse.....	29
6.1 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	29
6.2 Fortschritte Dritter.....	30
7 Erfolgte Veröffentlichungen des Ergebnisses	31

B. Abbildungen

- Abbildung 1: Grundkonzept der gezielten Körperschallerzeugung zum Stand der Antragstellung: Es soll die beste umsetzbare Realisierung eines im Fahrzeugunfall körperschallerzeugenden aCISS-Elements nebst der geeigneten Signalauswertung im Airbagsteuergerät gefunden werden. 1
- Abbildung 2: Das aCISS-Element (Aktor) erzeugt abhängig von der Deformationsgeschwindigkeit v_D charakteristische Strukturschwingungen, die sich über die Fahrzeugkarosserie ausbreiten und in dem Airbagsteuergerät, der ECU, mit der Körperschall-CISS-Sensorzelle digitalisiert und mit geeigneter Signalauswertung in die Deformationsgeschwindigkeit zurück transformiert werden. 6
- Abbildung 3: Mittelklassefahrzeug mit einer zentralen Unfallüberwachungseinheit, dem Airbagsteuergerät ohne verteilte Sensorik für die Frontalcrasherkennung. Das Crashmanagementsystem ist das zentrale Deformationselement in der Zeit, in der die Airbagzündentscheidung gefällt werden muss. Es besteht aus einem Querträger, häufig als Biegequerträger bezeichnet, und zwei Typschadenelemente, den Crashboxen. Der Querträger wird über die Crashboxen mit den Fahrzeuglängsträgern verbunden. Sie dienen bei Parkplatzkollisionen dem Schutz der Rahmenstruktur und müssen den ersten Kraftanstieg bei Hinderniskollision abfedern..... 7
- Abbildung 4: Erster Konzeptansatz der Ausgestaltung eines aCISS-Elements: a) Konzeptkonstruktion, b) CAD-Umsetzung durch Konstruktionsabteilung der OEMs, c) konzeptioneller Versuchsaufbau an Fahrzeugkarosserie im Körperschalllabor der Hochschule Ingolstadt. 17
- Abbildung 5: Wichtiger Innovationsschritt der mechanischen Umsetzung des aCISS-Elements: Statt einer stiftscherenden Grundkonzeption wird eine Körperschallanregesequenz über eine mechanische Ausgestaltung des abzutastenden Profils realisiert. 17
- Abbildung 6: Zeitdiskretes Anschlagen gezielter Eigenfrequenzen: Impulsartige Strukturanregung durch sprunghafte Entlastung, zeitliche Trennung einzeln angeschlagener Biegeschwinger wegen mechanischer Kopplung nicht möglich. Das Anschlagen entspricht einer impulsartigen Anregung und kann im Sonogramm (rechts) als horizontale Linie gefunden werden..... 18
- Abbildung 7: Zahnstange gegen festes Sinusprofil: mechanische Herausforderung stellt das Überspringen einzelner Profil-/Codierungselemente dar; auch hier häufig beobachtbare impulshafte Anregung, so dass eine gute Kopplung/Führung des Profils und Abtastelements notwendig wäre. 18
- Abbildung 8: Bewegter Stift in einem Sinusprofil – Schallplattenanalogie der geführten Nadel: Führung einer Abtastnadel durch codiertes Rillenprofil; Ideale Anregung bei geringer Geschwindigkeit sehr gut darstellbar. Vorspannung bestimmt erreichbare Amplitude. Sowohl Simulationen als auch die Konzeptuntersuchungen bestätigen das Verfahren in seiner Anregegüte. 19



- Abbildung 9: Ableitung konkreter Technologiedemonstratoren mit *Hasenohr*-Abtastnadeln, deren Form es erlaubt den Zielkonflikt zwischen hoher Vorspannung und Vermeidung einer hohen Profilabnutzung (spanendes Abtragen der ersten Prototypen hat die Entwicklung beschleunigt): a) Erste Konzeptskizze, die die Hasenohrabtastung verdeutlicht, b) abgeleitete Konstruktionszeichnung des endgültigen Prototypens, der als Grundlage der gefertigten Baugruppen c) diente..... 19
- Abbildung 10: Fertige Konstruktion des optimierten aCISS- Technologiedemonstrators mit dem Biegequerträger (grün)  rechts) Erster Versuchsaufbau zur Bewertung der Funktionsweise im Labor an der Hochschule Ingolstadt mit entsprechender Körperschallreferenzmesstechnik 20
- Abbildung 11: Prinzipielle Strukturanregung nach dem gegenläufigen Doppel-Sweep-Ansatz: Beginnend mit zwei unterschiedlichen Startfrequenzen f_{o1} und f_{u1} steigt die Frequenz des oberen Sweeps auf die Frequenz f_{o2} an und der untere Sweep fällt auf f_{u2} ab. 21
- Abbildung 12: Einkopplung geschwindigkeitsabhängiger Signale durch das aCISS-Element: mechanische Überlagerung und Ausbreitung der Information als mechanische Wellen über die Fahrzeugstruktur, Messung und Rückgewinnung der relativen Crashgeschwindigkeit v_{rel} 21
- Abbildung 13: Vorgehensweise bei der Bestimmung der relativen Crashgeschwindigkeit des aCISS-Elements: Die Frequenz-Amplituden Transformation fA-T vom Rohsignal über die nichtlineare Frequenzmodulation durch Filterung und Quadrierung bis hin zur, zur Geschwindigkeitsinformation proportionalen, Hüllkurvensteigung. 23
- Abbildung 14: Auswertung der Hüllkurvensteigung nach Anwendung der fA-T-Frequenz-Amplituden Transformation des Doppel-Sweeps bei Fallturmversuchen verschiedener Geschwindigkeit. Die maximale Geschwindigkeit am Fallturm beträgt 16 km/h 24
- Abbildung 15: Variable Laborcrashbox zur Funktionsmustervalidierung der aCISS-Konzeptstudien: Der Konzeptstudienhalter kann mit der Anschraubplatte an die Crashboxaufnahme  montiert werden und ermöglicht über zwei flexible Flanschplatten die Untersuchung der aCISS-Konzeptstudien. 25
- Abbildung 16: Erfolgreicher Nachweis des gezielten Körperschall unter Verwendung einer Sinusanregung, so dass gezeigt werden kann, Körperschall lässt sich mit einem Plattennadelkonzept am Fahrzeug erzeugen und auf die Rahmenstruktur aufgeben. ... 25
- Abbildung 17: Exemplarischer Versuchsaufbau aus den Validierungstest am Fallturm Mitte der zweiten Projektphase zur Findung des besten Mechanismus zur Strukturanregung. Der Fallturmeinsatz ist der notwendigen Erhöhung der Impactgeschwindigkeit auf 16 km/h geschuldet. 26
- Abbildung 18: Auszug aus den Validierungsversuchen des Plattennadelkonzepts im Fallturm auf dem Versuchsträger mit einer halbautomatisierten Signalauswertung zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit von Testergebnissen zwischen verschiedenen Messreihen. 26
- Abbildung 19: Verfahren zur Objektivierung der Auswertalgorithmen durch Kreuzkorrelation der gesuchten Abtast-Geometrie, hier eine Sweep-Geometrie, mit der tatsächlich aufgezeichneten Form. 27

Abbildung 20: Versuchskonfiguration der Rollbock-Versuche auf der Crashanlage von Volkswagen mit dem verbauten, im Berichtszeitraum optimierten aCISS-Crashelement; neben dem Aufbau des Versuchsträgers ist auch die jeweilig verwendete Barriere zu erkennen.....	27
Abbildung 21: Auswertemethode der Rollbockversuche auf der VW-Crashbahn. Die Variation der Geschwindigkeit bis zu 40 km/h erlaubte erstmals ein Testen hoher Geschwindigkeiten über der AZT Geschwindigkeit von 16 km/h. In der Beschleunigungsphase des aCISS-Elements wird die Datenaufzeichnung initialisiert und in dem Auswertebereich, bei näherungsweise konstanter Verfahrensgeschwindigkeit des aCISS-Elements, erfolgt die Datenanalyse.	28
Abbildung 22: Zusammenfassende Ergebnisse der Rollbockuntersuchung unter Verwendung des aus der fA-T (Frequenz-Amplituden-Transformation) abgeleiteten Crashererkennungskriteriums an den drei repräsentativen Sensorpositionen auf dem Fahrzeugtunnel. Das Kriterium ist direkt proportional zur relativen Crashgeschwindigkeit an allen Sensorpositionen!	28
Abbildung 23: Verwertung der Ergebnisse des aCISS-Forschungsprojekts.	30

C. Tabellen

Tabelle 1	Übersicht über die Aufgaben in den Projektphase.....	4
Tabelle 2:	Zuordnung und Ablaufplanung der Arbeitspakete.....	5
Tabelle 3:	Soll/Ist-Vergleich der geplanten/erreichten Meilensteine.....	16

I Kurzdarstellung

1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen

Passive Sicherheitssysteme in Kraftfahrzeugen sollen im Falle eines nicht mehr vermeidbaren Fahrzeugunfalls zu einer Minimierung der Unfallschäden führen. Hierzu gehören energieaufnehmende Fahrzeugrahmenstrukturen, den Fahrer haltende Sicherheitsgurte und an den Unfall angepasste Airbageinrichtungen. Die Erforschung des Zusammenspiels zwischen der mechanischen Sicherheitswirkung und der elektronisch gesteuerten Airbagaktivierung, hat sich das hier vorliegende kooperative Forschungsprojekt zur Aufgabe gemacht.

Bei der Deformation des Vorderwagens werden gezielt Strukturanregungen erzeugt, die Aufschluss über die relative Deformationsgeschwindigkeit ermöglichen. Diese Information liegt heute bei der Bewertung einer Unfallsituation nicht vor, da neben der eigenen Geschwindigkeit die Geschwindigkeit des Unfallgegners die Intrusion des Fahrzeugs bestimmt. Wäre die relative Crashgeschwindigkeit bekannt, ließe sich die Einschätzung des Gefahrenpotenzials der Unfallsituation sehr verlässlich treffen und damit der optimale Einsatz von Rückhaltemitteln wie Airbag und Gurtstraffer erreichen.

Hierfür wurde im Rahmen des Förderprojekts ein mechanisches Element in die Fahrzeugstruktur eingebracht, das gezielt charakteristisch und deterministisch Körperschall während der Deformation erzeugt. Das entwickelte System wird analog zum Projektkronym *aCISS-Element* bezeichnet. Die im Fahrzeugcrash durch das aCISS-Element gewonnene Geschwindigkeit der Deformation wird durch ein mechanisches Element auf die Fahrzeugstruktur aufgeprägt. Die a-priori-Kenntnisse über die Anregung durch das Element ermöglicht die Crashklassifikation im auswertenden Airbag-Steuergerät.

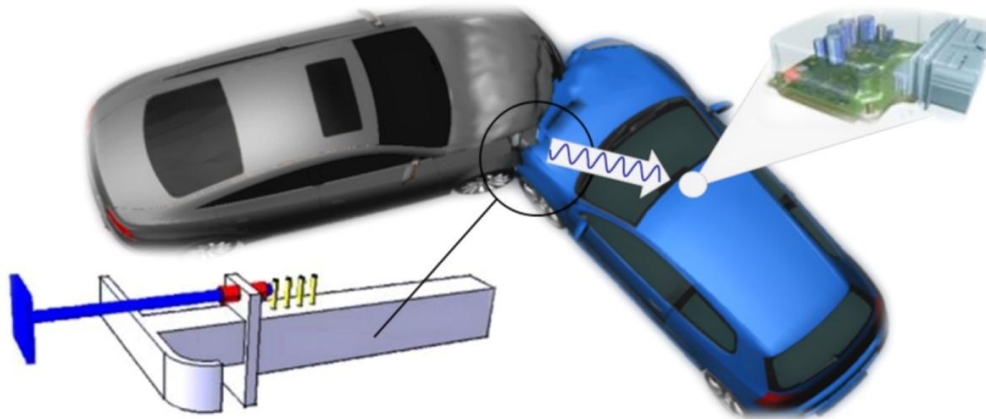


Abbildung 1: Grundkonzept der gezielten Körperschallerzeugung zum Stand der Antragstellung: Es soll die beste umsetzbare Realisierung eines im Fahrzeugunfall körperschallerzeugenden aCISS-Elements nebst der geeigneten Signalauswertung im Airbagsteuergerät gefunden werden.

Die Körperschallerzeugung ist damit nicht mehr passiv von der Fahrzeugdeformation abhängig, sondern wird aktiv generiert: active Crash Impact Sound Sensing, kurz aCISS. Vorteile bringt das neue Verfahren der Crasherkenkung in vielerlei Hinsicht. Zum einen wird die Crasherkenkung unabhängiger vom Aufbau des Fahrzeugs; zum anderen lassen sich wichtige Merkmale einer typischen Crashsituation bestimmen, die mit der Crasheschwere zusammengefasst werden können.

Die Crasheschwere bestimmt das Maß des Verletzungsrisikos der Fahrzeuginsassen in einer Unfallsituation. Das Airbagsystem soll die zu erwartende Crasheschwere in einer sehr frühen Crashphase erkennen und entsprechende Rückhaltemittel (Gurtstraffer, Airbags) auslösen können. Die Herausforderung an das Airbagsteuergerät hierbei ist, dass in Grenzsituationen lediglich 10-15 cm des Vorderwagens deformiert wurden bis eine Airbag-Zünd- bzw. Aktivierungsentscheidung durch das Steuergerät getroffen werden muss. Zu diesem Zeitpunkt wurde jedoch noch keine nennenswerte Crashenergie abgebaut, die in Form von Beschleunigungsmessung als dissipierte, verlorengegangene Arbeit bzw. Kraft, gemessen werden könnte. Hier eignet sich die Relativgeschwindigkeit der Unfallgegner zur Bestimmung der auftretenden Crashenergie auf Basis der kumulierten kinetischen Energie im System. Diese ist vollständig bestimmt, sobald die relative Crashgeschwindigkeit der kollidierenden Unfallgegner bekannt ist.

2 Planung und Ablauf des Vorhabens

2.1 Ziele des Vorhabens

Mit dem aCISS-Projekt sollte die neue Technologie der aktiven Körperschallerzeugung im Crash konsequent weiter erforscht werden, so dass ein leistungsfähigeres und kostengünstiges Konzept für intelligente Insassenschutzsysteme möglich wird. Durch die schnelle und genaue Erkennung der Crasheschwere kann das Insassenschutzsystem an die Unfallsituation angepasst ausgelöst und so das Verletzungs- sowie Todesrisiko für den Insassen deutlich reduziert werden. Zur Untersuchung der Machbarkeit im Fahrzeug und Sicherstellung der Verwertung von aCISS sind in das Projekt zwei Fahrzeughersteller VW und Audi, ein Mechanik- (Benteler) sowie ein Elektronikzulieferer (Continental) involviert worden. Die Einbindung der mittelständigen Unternehmen Stangl & Co GmbH, PSW engineering GmbH und PROCITEC GmbH in die Entwicklung sollte sicherstellen, dass das spezifische Know-how des aCISS-Projekts in die auf das Projekt folgenden Serienentwicklungsprozesse und die damit verbundene Wertschöpfung eingebunden wird. Ergänzende wissenschaftliche Unterstützung erhielt das Projekt und das Team der Hochschule Ingolstadt um Professor Brandmeier durch die Universität Magdeburg und die Universität Southampton.

Technisch/Wissenschaftliche Ziele des Vorhabens

Mittels einer neuen aCISS-Technologie sollten aktive Körperschallerzeugung im Crash und Codierung des Crashtyps möglich gemacht werden. Dadurch sollte es möglich werden, leistungsfähigere und kostengünstigere Konzepte für intelligente Insassenschutzsysteme wie beispielsweise Airbag- und Gurtstrafferansteuerungen weiter zu verbessern. Durch die schnelle und genaue Erkennung des Crashtyps galt es in der Planung des Forschungsvorhabens aCISS, die Insassenschutzsysteme angepasst an die Unfallsituation zu aktivieren, um das Verletzungsrisiko deutlich zu reduzieren.

Es sollte eine mechanische und signalpraktische Methode gefunden werden, welche die Information der Deformationsgeschwindigkeit, **die absolute Crashgeschwindigkeit**, liefern kann. Ein solches **aCISS-Element** mit passender Auswertelalgorithmik sollte so aufgebaut werden, dass es möglichst kostengünstig ist und die Systemkosten des Stoßfängersystems nicht wesentlich anhebt. Als übergeordnetes Leitbild stand die Verbesserung und Verbreitung innovativer Sicherheitstechnologie in weit verbreitete Klein- und Mittelklasseplattformen, um neue Sicherheitstechnologien für jedermann möglich zu machen. Dazu musste eine schnelle Crasherkenntnis und eine optimale Auswertung der Crashsignale definiert werden, so dass letztlich zwischen verschiedenen Unfallarten unterschieden werden kann. Das Projekt sollte damit ein

weiterer Wegbereiter der übergeordneten „Vision Zero“, der Vision von Null-Verkehrstoten, durch die optimale Ansteuerung passiver Sicherheitstechnik sein.

Allgemeine Ziele der Kooperation

Bei der Untersuchung der Machbarkeit des zu realisierenden aCISS-Elements sollte die Einbindung der OEMs VW und Audi sowie der Zulieferindustrie aus Sicht der Mechanik mit der Benteler AG und der Elektronik mit der Continental AG intensiv gepflegt werden, damit eine Umsetzung später auch erfolgreich durchgeführt werden kann. Eine frühzeitige Einbindung der KMU in dieses Kooperationsnetzwerk sollte die Anbindung dieser an die Gewinnträchtigen OEMs ermöglichen. Die Verzahnung galt als Garant der nachhaltigen Wertschöpfung.

Weiter galt es, die zur Verfügung stehenden und standardmäßig verwendeten Körperschallfahrzeugsensoren im Rahmen des Kooperationsprojekts auf das aCISS-Verfahren zu optimieren und darüber hinaus auf mögliche weitere Anwendungsfelder zu übertragen. Durch die Verwendung von hochintegrierter Fahrzeugsensorik kann von einem hohen Nutzungsgrad für andere Zweige der Technik, beispielsweise für anschließende Forschungsarbeiten, geschlossen werden. Dazu gehört die Überwachung von Werkzeugmaschinenbau in der Produktion, Impacterkennung in der Luftfahrt, Zustandsbewertungen von Gebäuden und Brücken auch in erdbebengefährdeten Gebieten im internationalen Umfeld. Letztlich sollten die KMU langfristig profitieren und neue Produkte in anderen Wirtschaftszweigen erschließen können.

Umsetzungsziel

Es sollte ein konkretes Bauteil gefunden und prototypisch realisiert werden, das in der Vorderwagenstruktur eines Personenkraftfahrzeugs in die Crashrahmenstruktur eingebaut werden kann und bei Kollision gezielt Körperschall erzeugt. Die dabei erzeugte Information muss in einem Airbagsteuergerät, das typischerweise in der Fahrzeugmitte auf dem Mitteltunnel verbaut wird, ausgewertet werden können. Das abstrahierte Crashsignal, das für eine Kalibration des Airbagsteuergerätes verwendet werden sollte, musste einfach handhabbar sein, damit eine Airbagauslegung auch praktikabel ist, ohne Kenntnisse der höheren Wellenmechanik und Signaltheorie. Im Idealfall ist das Auswertekriterium linear, d. h. das Auswertekriterium musste direkt proportional zur gesuchten Crashdeformationsgeschwindigkeit sein.

2.2 Aufteilung der Arbeitspakete

Auf Basis der Herausforderung, einen Technologiedemonstrator als Konzeptstudie eines seriennahen Crash- und Stoßfängersystems, das sowohl Anforderung der Fahrzeughersteller als auch der Systemlieferanten von Mechanik (Benteler) und Elektronik (Continental) erfüllen kann, wurde im Kooperationsnetzwerk ein belastbarer Projektablaufplan erarbeitet. Dieser sah eine projektübergeordnete Planung bei der Hochschule Ingolstadt vor und unterteilte die Arbeitsinhalte in die Hauptarbeitsfelder Mechanik und Signalverarbeitung.

Projektplanung und Organisation: Projektablauf, Arbeitsberichte, Verteilung der Aufgaben, Abstimmung, Freigaben, Kooperationsverträge, Mitarbeiterpflege, Betreuung von Studierenden

Mechanische Realisierung: Die ersten Arbeiten befassten sich mit der systematischen Suche nach dem besten und v. a. realisierbaren Verfahren zur Erzeugung von Körperschall an einer Fahrzeugkarosse mit der Berücksichtigung der Messposition im Fahrzeugtunnel. Mit der Findung des Plat-

and Safety (Regensburg) als wichtigem Systemlieferanten, der kooperativ verbundenen Universität Magdeburg und der Hochschule für angewandte Wissenschaften Ingolstadt als systembeschreibendem Know-how-Träger im Gebiet von Körperschallphänomenen im Fahrzeugcrash, gelang es Mitte 2008 mit der Einführung des sog. Körperschall-Airbag im Golf VI erstmals, die Ergebnisse eines an der Hochschule Ingolstadt begonnenen Forschungsprojektes in Serie zu bringen.¹

Mittels Auswertung hochfrequenter Geräusche, die im Fahrzeugcrash entstehen, wird in jedem Golf VI die umfangreiche Crash-Erkennungslogik unterstützt. Diese Unterstützung basiert auf dem umfangreichen Wissensgewinn, den die Hochschule Ingolstadt im Rahmen der Forschungsprojekte zur Frontalcrash-Erkennung mit dem Kooperationsnetzwerk aufbauen konnte. Zwar kann der Crash mittels Körperschall erkannt und zentral im Fahrzeug als unabhängige Messgröße bestimmt werden,² was nicht zu Letzt zu der Einführung in der Großserie des Golfs VI führte.³ Eine direkte Ableitung der relativen Crashgeschwindigkeit war jedoch nicht möglich.

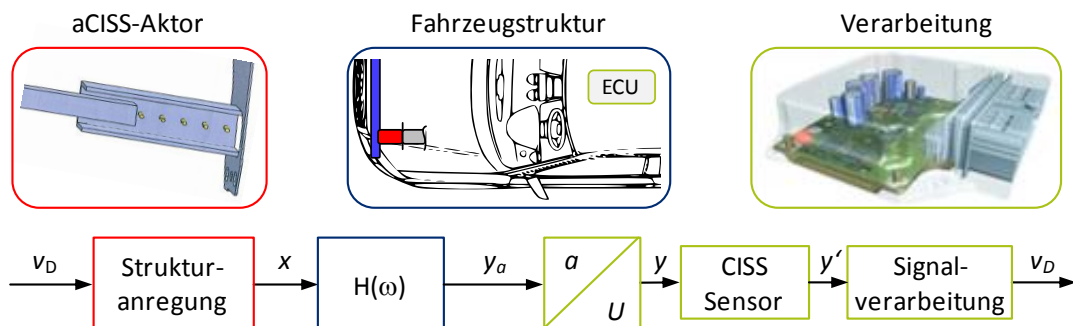


Abbildung 2: Das aCISS-Element (Aktor) erzeugt abhängig von der Deformationsgeschwindigkeit v_D charakteristische Strukturschwingungen, die sich über die Fahrzeugkarosserie ausbreiten und in dem Airbagsteuergerät, der ECU, mit der Körperschall-CISS-Sensorzelle digitalisiert und mit geeigneter Signalauswertung in die Deformationsgeschwindigkeit zurück transformiert werden.

3.1 Körperschalltechnologie zur Crasherkenkung

Bei der Erkennung von Unfallsituationen von Personenkraftwägen stellt die Körperschallmessung eine neue Technologie dar.⁴ Das Airbagsteuergerät wertet die in einem Crash entstehenden Struktur- bzw. Körperschallschwingungen aus und ermöglicht eine schnelle, zielgerichtete Auslösung der Rückhaltemittel.⁵ Die Entstehung der auswertbaren Körperschallschwingungen hängt stark von der Konstruktion des Fahrzeugvorderwagens ab.^{6,7} Jedes neue, mit der Körperschall-Technologie auszustattende Fahrzeug, muss sehr aufwendig im Hinblick auf Körperschallentstehung sowie Übertragung untersucht werden.⁸ Dies liegt im Beispiel des Frontalcrashes hauptsächlich an der fehlenden Standardisierung der Stoßfänger-

¹ Neue Presse Passau: Bayerischer Innovationspreis für hörenden Airbag. 03. Juni 2008

² Spannaus, P.: *Körperschallentstehung im Fahrzeugcrash*. Fortschritte der Akustik – DAGA 2008; März 2008

³ Bayerischer Innovationspreis 2008; Für die Technologiekooperation Crash Impact Sound Sensing (CISS)

⁴ M. Feser, D. McConnel, T. Brandmeier, C. Lauerer: Advanced Crash Discrimination using Crash Impact Sound Sensing. SAE 2006, Detroit

⁵ M. Luegmair, L. Oestreicher: Structure-born sound transmission in vehicle structure as an important influence on structure-borne sound based crash detection. ATZ World Wide; Page 160 – 165; February 2008

⁶ L. Cremer, M. Heckl: *Körperschall*. Springer, 1996

⁷ F.P. Mechel: *Formulas of Acoustics*, Springer 2004

⁸ L. Oestreicher: Korrelationsanalyse von hochfrequenten Körperschallsignalen. Fortschritte der Akustik; März 2008

systeme. Jeder Fahrzeughersteller entwickelt für jedes neue Fahrzeug separate Typschaden- und Stoßfängerelemente, deren Konstruktion die Krafteinleitung und damit die Körperschallanregung des Fahrzeugs im Crashfall bestimmt.

3.2 Energieabsorption im Fahrzeugcrash: Typschadenelemente

Prallen zwei Fahrzeuge aufeinander, muss die gesamte Energie, die die Unfallpartner in das unglückliche Geschehen einbringen, absorbiert werden. Das Quadrat der Fahrzeuggeschwindigkeiten bestimmt die zu vernichtende Energie zusammen mit der Fahrzeugmasse. Meist wird der Großteil der Energie in Form der Fahrzeugdeformation aufgebraucht.⁹ Die Steifigkeit der deformierenden Baugruppen führt letztlich zu der auf den Fahrer durchschlagenden Belastung.¹⁰

Entsprechend wichtig sind die konkreten Realisierungen der Energieabsorbierenden Baugruppen im Vorderwagenbereich, dem Crashmanagementsystem. Die Crashboxen, vgl. Abbildung 3, nehmen nicht nur die Crashenergie bei einer Parkplatzkollision zum Schutz der Fahrzeugrahmenstruktur auf, sondern stellen auch das zentrale Element dar, mit dem sich der Craschwererlauf einstellen lässt,^{11,12} da der Kraftaufbau dieser Baugruppe unter Belastung, der des Insassens entspricht.¹³

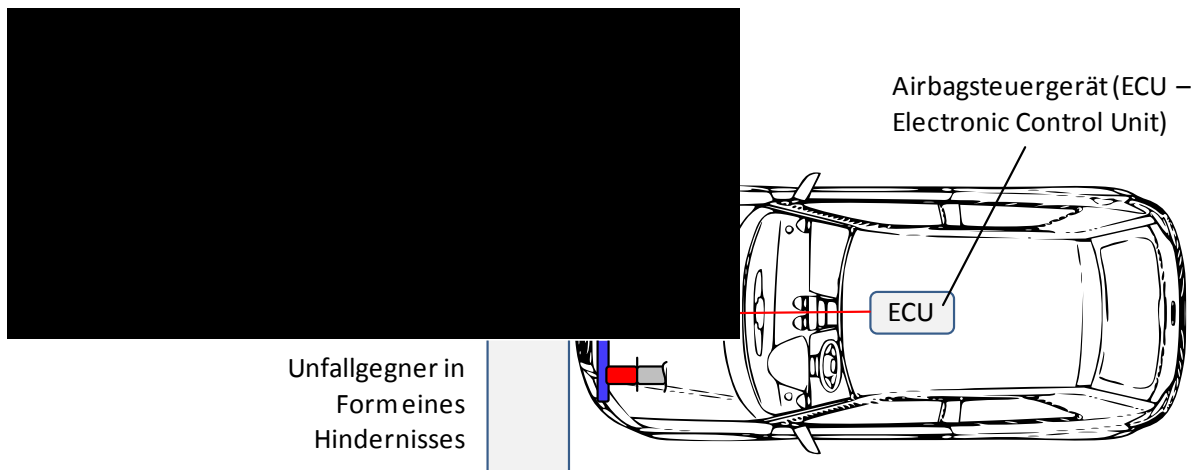


Abbildung 3: Mittelklassefahrzeug mit einer zentralen Unfallüberwachungseinheit, dem Airbagsteuergerät ohne verteilte Sensorik für die Frontalcrasherkennung. Das Crashmanagementsystem ist das zentrale Deformationselement in der Zeit, in der die Airbagzündentscheidung gefällt werden muss. Es besteht aus einem Querträger, häufig als Biegequerträger bezeichnet, und zwei Typschadenelemente, den Crashboxen. Der Querträger wird über die Crashboxen mit den Fahrzeuglängsträgern verbunden. Sie dienen bei Parkplatzkollisionen dem Schutz der Rahmenstruktur und müssen den ersten Kraftanstieg bei Hinderniskollision abfedern.

⁹ G.A. Peters, B.J. Peters: Automotive Vehicle Safety. Tylor and Francis, 2002

¹⁰ H.P. Lang, K. Knödler, P. Kocher, M. Röllecke, K. Oswald: Erweiterte Crashsensierung mit zusätzlichen Beschleunigungssensoren, Radarsensoren und Winkelgeschwindigkeitssensoren. VDI-Berichte 1471, VDI-Verlag, 1999

¹¹ B. Barényi: Kraftfahrzeug, insbesondere zur Beförderung von Personen. Deutsches Patent, Nummer 854 157, Oktober 1952

¹² F. Kramer: Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen, Biomechanik – Simulation und Sicherheit im Entwicklungsprozess. Vieweg Verlag, 2006

¹³ K. Volz, F. Dirschmid, F. Duddeck: Optimierung der Crasheigenschaften von Rohkarosserien in der frühen Phase der Produktentwicklung. VDI-Berichte 1967, VDI-Verlag, 2001

So kommt der Baugruppe des Typschadenelements in der mechanischen Auslegung des Fahrzeugs eine sehr zentrale Rolle zu. Je nach Hersteller besteht es aus hochfestem Aluminium oder Stahl und wird durch intensive Entwicklung so geformt, dass der Kraftverlauf unter Deformation möglichst ohne große Kraftschwankungen auftritt, um den Insassen optimal abzufedern.^{14,15}

3.3 Signalverarbeitung der Crasherkenkung

Crasherkenkung erfolgt durch Auswertung von abgesicherten Sensoren und Information. Die Fahrzeuggeschwindigkeit stellt hierbei eine nur schwer referenzierbare Größe dar. Real werden im Wesentlichen Beschleunigungen des Fahrzeugs registriert.¹⁶ Eine Straßen-/Reifen-Kontaktpaarung kann bei Straßenfahrzeugen nicht mehr als die maximale Haftreibung von 10 m/s^2 annehmen.¹⁷ Im etablierten Sprachgebrauch der Crasherkenkungsalgorithmen ist das die Beschleunigung auf die Gravitation bezogen: 1 g .¹⁸ Wenn die Beschleunigung in einem Fahrzeug eine Schwelle von 2 g überschreitet, kann das nur durch massive äußere Einflüsse geschehen. Da das Fahrzeug im Crash deformiert wird, sind die tatsächlich messbaren Beschleunigungen in der ersten Crashphase, also bevor der Motorblock als erstes hartes Hindernis getroffen wird, mit ca. 80 Millisekunden zwar hoch, aber nicht eindeutig einem Crash zuzuordnen.¹⁹ Parkplatzkollisionen erzeugen in den ersten 50 Millisekunden ähnliche Beschleunigungsverläufe wie sehr schnelle Fahrzeug-Fahrzeugkollisionen.²⁰

Die erforderliche Erkennungszeit die bleibt, den Airbag zu aktivieren bevor der Insasse, durch die Massenträgheit bewegt, auf dem Lenkrad einschlägt, beträgt für die Crasherkenkung maximal 25 Millisekunden.^{21,22} Um diesen Konflikt zu lösen und den Insassen optimal absichern zu können, wird bei vielen Fahrzeugen eine im Fahrzeug verteilte Beschleunigungssensorik verbaut.²³ Die Anzahl der Sensoren ist aus Systemkostensicht stets ein Zielkonflikt zwischen Kosten und Performance.

Die körperschallbasierte Crasherkenkung kann unter, im Vorgängerprojekt detailliert aufgezeigten, Bedingungen den Zielkonflikt entschärfen, in dem eine Körperschallmesszelle statt einer Beschleunigungsmesszelle auf der Hauptplatine des Airbagsteuergeräts aufgebracht wird.^{24,25} Damit kann aus der Mess-

¹⁴ H.P. Lang, K. Knödler, P. Kocher, M. Röllecke, K. Oswald: Erweiterte Crashsensierung mit zusätzlichen Beschleunigungssensoren, Radarsensoren und Winkelgeschwindigkeitssensoren. VDI-Berichte 1471, VDI-Verlag, 1999

¹⁵ M. Bühler, H. Gao: Dynamical fracture instabilities due to local hyperelasticity at crack tips. Nature, 2006

¹⁶ D.C. Viano: Seat Belts: The Development of an Essential Safety Feature. Society of Automotive Engineers Inc. USA, 2003

¹⁷ Robert Bosch GmbH: Autoelektrik, Autoelektronik. Vieweg Verlag, 2007

¹⁸ U. Rokosch: Airbag und Gurtstraffer. Vogel Fachbuch, 2002

¹⁹ R. Kent: Air Bag Development and Performance – New Perspectives from Industry, Government and Academia. Society of Automotive Engineers Inc USA, 2003

²⁰ P. Spannaus, R. Ertlmeier: Expanding design process of the Airbag Control Unit ACU - Connection of active and passive safety by using vehicles dynamics for rollover and side crash detection. Sixth Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems WISES 2008, Conference Proceedings, Page 75 - 83

²¹ F. Kramer: Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen, Biomechanik – Simulation und Sicherheit im Entwicklungsprozess. Vieweg Verlag, 2006

²² M. Huang: Vehicle Crash Mechanics. CRC Press, 2002

²³ P. A. Bois: Crashworthiness Engineering. Livermore Software Technology Corporation, 2004

²⁴ M. Luegmair: Randbedingungen der Körperschallausbreitung im Fahrzeug zur Crasherkenkung. Fortschritte der Akustik - DAGA 2008; März 2008

²⁵ P. Spannaus, R. Ertlmeier: Expanding design process of the Airbag Control Unit ACU- Connection of active and passive safety by using vehicles dynamics for rollover and side crash detection. Sixth Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems WISES 2008, Conference Proceedings, Page 75 - 83

zelle sowohl das niederfrequente Beschleunigungssignal in Fahrzeuginnenrichtung a_x als auch die hochfrequente Körperschall- und Strukturschwingungsinformation gewonnen werden. Die zusätzliche unabhängige Messgröße erlaubt bei geeigneter Vorderwagenstruktur eine Erhöhung der Crasherkenntnisperformance bei deutlich geringeren Systemkosten als mit verteilter Sensorik. Jedoch sind die Signalgüte und deren Reproduzierbarkeit stark von der Fahrzeugkonstruktion abhängig.

4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

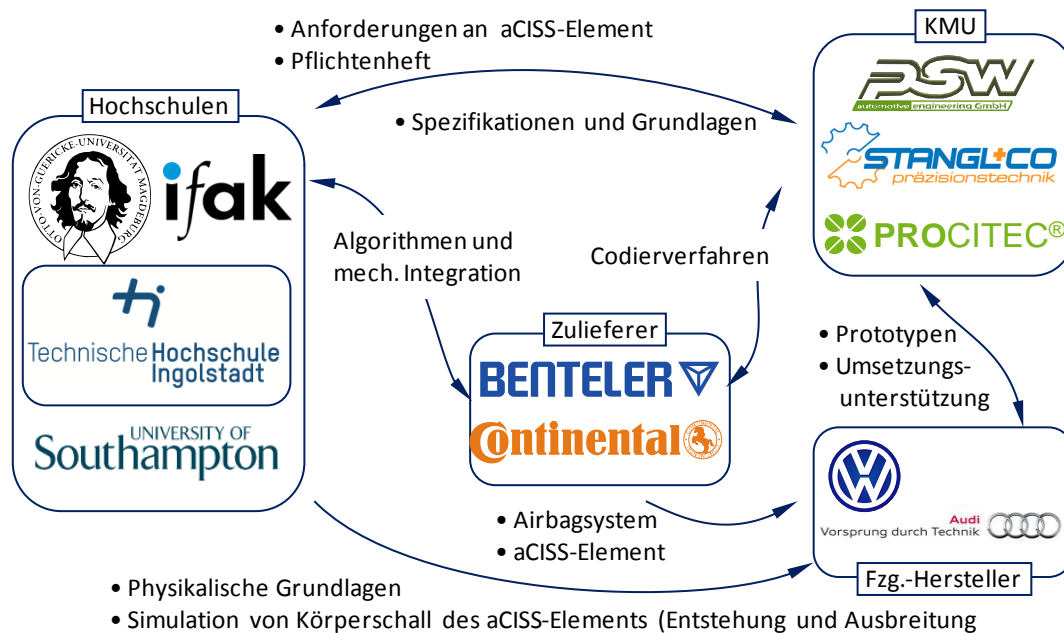
Die Aufgabenteilung erfolgte in Anlehnung an die Kernkompetenzen der Kooperationsteilnehmer und beschreibt die jeweiligen Anteile der Projektpartner bei der aCISS-Technologie-Entwicklung.

Kooperationsuniversitäten Magdeburg und Southampton: Forschungsunterstützung bei Signalverarbeitung und Bewertung von Strukturmechanik. Entwicklung von Simulationsverfahren.

Mechanikzulieferer Benteler: Fertigung und Realisierung der Technologiedemonstratoren, Bereitstellung der Fallturmeinrichtung zur Untersuchung des Deformationsverhaltens.

Elektronikzulieferer Continental: Entwicklung der Sensorik und serienreifer Signalverarbeitung; Definition der Anforderungen für den CISS-Sensor zweiter Generation.

Fahrzeughersteller Volkswagen und Audi: Bereitstellung von Systemanforderungen und Gütekriterien für eine realistische Umsetzung, erweiterte Rollbockversuche und Bereitstellung einer Crashbahn zur Verifikation des Technologiedemonstrators.



Die einzelnen Bereiche, begonnen bei den Forschungseinrichtungen hin zu den verbundenen KMU über die Schnittstellenfunktion der Elektronik- und Mechanik-Zulieferindustrie, wurden in ihrer Aufgabenverteilung und dem zugehörigen Rollenverständnis gezielt eingebunden.

Forschungseinrichtung: Die Hochschule Ingolstadt hat ihre wissenschaftliche Kompetenz in den Bereichen Signaltheorie, Modellbildung, Sensorik, Maschinendynamik und -akustik sowie Mechanik, ihre Entwicklungskompetenz in den Bereichen Algorithmik, Mikroprozessortechnik, Fertigungs-

technik, Systemintegration und prozessbegleitende Erprobung und ihre Realisierungskompetenz in den Bereichen Schnittstellen zur Systemintegration, prozessbegleitende Erprobung sowie Prozessvervollständigung eingebracht. Die Hochschule Ingolstadt war an allen Entwicklungsschritten zumindest begleitend und betreuend beteiligt, und hat mit ihren wissenschaftlichen Mitarbeitern unter der wissenschaftlichen Leitung von Prof. Brandmeier sowohl die inhaltlichen als auch die Aufgaben in der Projektkoordination übernommen.

Elektronik-Zulieferer: Der Elektronik-Zulieferer Continental hat sich in den Bereichen Elektronik und Software, Seriensensor, Integration in bestehende Systeme zum Insassenschutz und der Applikation eingebracht. Insbesondere die Anforderungen an ein Codierungs- und Übertragungsverfahren im Hinblick auf die Integrierbarkeit in Insassenschutzsysteme wurden hier definiert und erarbeitet. Eine intensive Unterstützung des Projekts und des Konsortiums durch den Elektronik-Zulieferer erfolgte sowohl mit der Bereitstellung von System-Know-how als auch in Form von Sensorik, Messmitteln und Laborfläche.

Mechanik-Zulieferer: Die Benteler AG hat sich im Bereich der technischen Mechanik durch die Entwicklung, Realisierung und Integration der mechanischen Signalerzeugung, der mechanischen Realisierung des aCISS-Elements, intensiv eingebracht. Dazu gehörten anfänglich die Adaption in vorhandene Systeme und der Aufbau von Prototypenträgerplattformen sowie das in der letzten Projektphase neu entwickelte Crashmanagement-System mit der dazugehörigen Deformationsstruktur für die Erfüllung der Fußgängerschutzanforderungen. Die notwendigen Validierungstests für den Nachweis der allgemeinen Systemanforderungen, wie Kraftniveau und Energieabsorption im Crashfall eines neuen Crashelements, wurden im Rahmen von Versuchen an der Benteler Fallturmeinrichtung durchgeführt. Für die projektabschließenden Validierungstests im Rahmen von Rollbock- und Crashtests mit Gesamtfahrzeugen, stellte Benteler die erforderlichen aCISS-Demonstratoren zur Verfügung.

Automobilhersteller: Die Audi AG und die Volkswagen AG gaben Hinweise und Empfehlungen bezüglich der konkreten Anforderungen für die mechanische, elektronische und algorithmische Realisierung im Hinblick auf eine Fahrzeugintegration. Durch die Ermöglichung einer umfangreichen Crashtestserie im Rollbockcrashversuch mit insgesamt 16 gefahrenen Tests, haben sich die OEMs intensiv in das Projekt eingebracht und ihre deutliche Bereitschaft eines möglichen Serieneinsatzs des aCISS-Systems gezeigt.

Verbunde Unternehmen: Die Ergebnisse der wissenschaftlichen Untersuchungen wurden im Entwicklungsprozess validiert und in Kooperation mit den Firmen PROCITEC GmbH, PSW automotive engineering GmbH sowie Stangl & Co. Präzisionstechnik GmbH bis zum ersten Demonstrator konzeptionell erarbeitet. Dabei übernahm die PSW automotive engineering GmbH den Schwerpunkt der Konstruktion und wurde in der späteren Projektphase vermehrt durch die Konstruktionsabteilung der Benteler AG ergänzt. Die Stangl & Co. Präzisionstechnik GmbH, die auf die Fertigung von Präzisionstechnik und den Bau von Prototypen spezialisiert ist, sollte die ersten Prototypen bzw. Technologiedemonstratoren realisieren. Es hat sich jedoch bereits in der ersten Projektphase gezeigt, dass für die Crashelemententwicklung Präzisionstechnik kaum erforderlich ist, so dass die gemeinsamen Arbeiten hier nicht weiter intensiviert werden konnten. Die Firma PROCITEC GmbH konnte einen sehr wichtigen Beitrag zur anwendungsorientierten Signalverarbeitung geben und trug maßgeblich zu der späteren mechanischen und algorithmischen Realisierung des Übertragungsverfahrens und der Extraktion der Kenngrößen aus dem übertragenen Signal bei.

II Eingehende Darstellung

5 Wesentliche Ergebnisse des Forschungsprojekts

Jedem Meilenstein wurden wichtige Schlüsselergebnisse zugewiesen, die zur Erfüllung und Erreichung des Forschungszieles notwendig waren. Im Soll/Ist-Vergleich (Tabelle 3) werden hier die Planmeilensteine genannt und mit den erreichten Ergebnissen gegenübergestellt. Dabei orientiert sich die Nummerierung an dem zugeordneten Arbeitspaket. Wenn ein Arbeitspaket als Voraussetzung für das nächste Paket dient, besitzt es keinen eigenen Meilenstein.

5.1 Soll/Ist – Vergleich

Der Vergleich zwischen geplanten und erreichten Arbeitsergebnissen hat auf der Planungsseite den Projektantrag zur Referenz und gibt eine überblickende Darstellung der **wesentlichen** Ergebnisse des Gesamtvorhabens. Eine weiterführende Erläuterung und detaillierte technische Diskussion der erzielten Arbeitsergebnisse der Arbeitspunkte AP0 bis AP4 erfolgt anschließend. Die Gliederung folgt den drei Projektphasen Konzeptionierung, Realisierung und Optimierung.

APs	Geplante Meilensteine: Soll	Erreichte Meilensteine/Ergebnisse: Ist
1. Projektphase: Konzeptphase und beginnende Entwicklungsphase		
AP1.1.1 AP2.1.1	Recherche	Keine Patente im Bereich der aktiven Körperschallerzeugung im Fahrzeugcrash; Abstimmungs- und Expertengremien zur Sammlung möglicher Ansätze einer gezielten Signalmodulation unter Berücksichtigung der Dissipation von BiegeWellen auf dünnen Fahrzeugblechen
AP1.1.2	Morphologische Konzeptfindung	Untersuchung von vier unterschiedlichen Körperschallerzeugungsmethoden: Biegeschwinger bzw. Kammstrukturen, Scherstifte, Abtastnadelkonzept, geführte Nadel bzw. Plattennadelprinzip

AP1.1.3	Machbarkeitsbewertung der Konzepte	<p>Scherstifte: transiente Körperschallerzeugung in Verbindung mit Wellenausbreitung auf dünnen Fahrzeugblechen macht einen Rückschluss auf Geschwindigkeit unmöglich.</p> <p>Biegeschwinger: Kammartige Anordnung von Biegeschwingern, die nacheinander bei Fahrzeug-Hindernis-Kontakt über einen Hebelmechanismus angeschlagen werden führt zu einer geschwindigkeitsabhängigen Überlagerung von Biegeeigenfrequenzen: theoretisch sehr gut, mechanisch ist die gegenseitige Wechselwirkung der Einzelelemente nicht zu unterdrücken und für eine Umsetzung sehr hinderlich.</p> <p>Abtastnadel: Zahnstangenprofil gleitet ratschend über eine Abtastkante, was zu geschwindigkeitsabhängiger Strukturanregung führt. Die materialbedingte Steifigkeit der Abtastpaarung führt zu großer Anregung der Systemeigenfrequenzen und Überspringen von Abtastkanten: ungeeignet für die Weiterverfolgung der gezielten Körperschallanregung</p> <p>Geführte Nadel: Analog einer Schallplatte wird eine stiftartige Abtastnadel durch eine gefräste Wellenstruktur geführt, um das System geschwindigkeitsabhängig anzuregen. Geringe Störgrößenanfälligkeit und sehr gute Wiederholbarkeit der Strukturanregung: Favorisierte Methode</p>
AP1.2.1	Ausarbeitung und Aufbau Prototypen	Definition und Abstimmung eines prototypennahen Trägersystems, mit dem die vier Körperschallentstehungsmechanismen am Fahrzeug getestet werden können, um das optimale Grundkonzept zu selektieren.
AP2.1.2	Signaltheoretische Codierungskonzepte	<p>Bewertung und systematische Entwicklung möglicher Codierungskonzepte zur Strukturanregung und zur Signalauswertung im Steuergerät wurden untersucht. Strukturanregung: Sinus und Sweep Anregungen, Impulsanregungen, Eigenfrequenzanregung. Auswertung: Kreuzkorrelation geglätteter Spektren, Inverse Frequenzfilterung, Nullstellenzählung im Zeitsignal, Frequenz-Amplituden-Transformation fA-Transformation, Auswertung der Phaseninformationen.</p> <p>Dabei ist als wichtige Randbedingung immer zu berücksichtigen, dass eine Modulation des hochfrequenten geschwindigkeitsabhängigen Körperschallsignals in ein niederfrequentes Nutzsinal möglich sein muss, damit eine Auswertung in dem Airbagsteuergerät überhaupt erst möglich wird.</p>
AP2.1.3	Bewertung der Codierungen	Als stabilste und geeignetste Kombination aus Anregung und Signalinterpretation hat sich die Doppel-Sweep-Anregung mit der fA-Transformation herauskristallisiert.

AP2.1.4	Reihenfolge der zu untersuchender Codierungen	Die Auswerte- und Anregemethoden wurden projektbegleitend kontinuierlich auf die Messdaten der vielzähligen Messreihen angewendet und kritisch bewertet. Eine Definition der Reihenfolge hat sich in der ersten Projektphase als nicht zielführend herausgestellt, da sich die Wechselwirkung zwischen mechanischer Anregegüte und Signalauswertemethode als zu groß und nicht voneinander trennbar gezeigt hat.
AP2.2.1	Entwurf des Testsetup für die Prototypentests	Für mögliche Testszenarien der ersten Prototypen- und Konzepttests wurden drei wichtige Versuchsaufbauten vorgenommen: Pendeltests mit großer Impactmasse und Anbindung des Technologiedemonstrator an einer Fahrzeugkarosserie; Fallturmtest zur Abdeckung der crashrelevanten Testgeschwindigkeiten von 8, 16 und 24 km/h; realitätsnahe Rollbocktests auf einer Crashbahn mit einer rollbaren Fahrzeugkarosserie (Trolley)
AP3.1	Konzeptfindungsbegleitende Laborversuche	Zur Validierung und Findung des optimalen Anregungsmechanismus wurde ein Konzeptträger entwickelt, der über genormte Anschlussflanschmöglichkeiten sowohl auf einer CNC-Fräse mit definierter Geschwindigkeit auch in den Fahrzeugprototypentests Verwendung fand, vgl. AP1.1.3 und AP2.1.2.
AP3.2	Funktionsprüfung der Prototypen	Auf einer CNC-Fräsmaschine mit konstanter Tischverfahrergeschwindigkeit konnte der Strukturanregemechanismus der geführten Nadel als Optimum identifiziert werden.
AP3.3	Messtechnische Bewertung der Prototypen	Zur Untersuchung und Aufzeichnung standen verschiedene Messeinrichtungen zur Verfügung: crashfeste Messboxen von Continental (Eigenentwicklung), Crashanlagen, hocho sensible Labormesstechnik für die Pendel-, Prototypen-, Konzept- und Absicherungstestreihen im Labor der Hochschule Ingolstadt.
AP3.4	Messtechnische Bewertung der Codierung	Grundlage einer Codiergütebewertung war die halbautomatisierte Konvertierung der mit drei unterschiedlichen Messsystemen aufgenommen Körperschallinformationen und deren skriptbasierte Verarbeitung mit Matlab: Zeitverläufe, Spektralanalysen, Spektralglättung, Neuronale Netze, Sonagramme.
AP3.5	Crashtests der ersten Prototypen	Im Rollbocktest konnte die geschwindigkeitsabhängige Körperschallanregung und die Auswertbarkeit der Deformationsgeschwindigkeit mit den Strukturschwingungssignalen, gemessen an der Airbagsteuergeräteposition auf dem Fahrzeugmitteltunnel, mit umsetzungsnahem Technologiedemonstrator belegt werden.

2. Projektphase: Entwicklungs- und beginnende Optimierungsphase

AP1.2.3	Auswertung der mechanischen Testergebnisse	In enger Übereinstimmung mit AP1.1.3 wurden die Anregungskonzeptstudien über einen am Fahrzeuglängsträger montierbaren Prototypenträger mittels Pendelversuch an der realen Struktur untersucht: Bestätigung der reproduzierbaren Körperschallerzeugung durch das geführte Nadelkonzept und Messbarkeit der erzeugten Frequenzmodulation an den typischen Steuergerätepositionen auf dem Mitteltunnel.
AP1.3.1	Festlegung einer Simulationsstrategie für Optimierung	Zur Bewertung der Anregemechanismen wurden die in AP1.1.2 definierten Körperschallanregemechanismen mit dynamischen FEM Simulationen sowohl in ANSYS als auch CATIA V5 durchgeführt. Dabei kann aber nur der Anregemechanismus abgebildet werden. Zur Simulation der Körperschallausbreitung wurde an der Hochschule Ingolstadt eine eigenständige Transmission-Line-Wellenausbreitungssimulation entwickelt, die hochfrequente Wellenausbreitung durch Fahrzeugstrukturen abbilden kann. Herkömmliche Simulationsverfahren der FEM können dies konzeptbedingt nicht in endlicher Zeit leisten.
AP1.3.2	Überarbeitung der Konstruktion	Die Anregung von Körperschall mit einer geführten Abtastnadel führt zu einer sehr hohen Belastung der Stift/Nadelaufnahme, und großen Verspannungen der Halterungen, so dass für eine gezieltere und wenig spanendere Anregung ein biegebalkenartiger Stiftehalter entwickelt wurde, der Hasenohrstiftträger.
AP1.3	Übertragungscharakteristik	Das Fahrzeug erweist sich nach der Systemanregung an einem der beiden Längsträger als starker Tiefpass, da die Wellenausbreitung hauptsächlich aus dispersiven BiegeWellen besteht, deren Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Frequenz abhängt, so dass es zwingend notwendig wird, die Geschwindigkeitsinformation der Deformationsgeschwindigkeit auf eine Trägerfrequenz zu modulieren.
AP2.2.2	Auswertung der Codierungssignale	Mit der Doppel-Sweep-Anregung, bei der ein aufsteigender und ein absteigender Sweep erzeugt wird, kann aus dem auf der Fahrzeugkarosserie abgetasteten BiegeWellen durch die Bildung einer Hüllkurve, was einer nichtlinearen Signalfaltung entspricht, die Frequenzinformation des Sweeps decodiert werden, indem die bei der Faltung erzeugten niederfrequenten Signalanteile ausgewertet werden, die ebenfalls noch die Information der gesuchten Verfahrensgeschwindigkeit enthalten.
AP2.3.1	Anpassung der Codierungsstrategie	Festgelegte Codierungsstrategie mit Doppel-Sweep-Anregung und Frequenz-Amplituden-Transformation (fA-T) muss mechanisch realisiert werden. Hierbei hat sich als besondere Herausforderung die Anbindung der Abtastnadel erwiesen. Die Länge der Halterungen für die Abtastnadeln, vgl. Abbildung 9, wurden durch einen intensiven Iterationsprozess festgelegt.

AP2.3.2	Verbesserung der Signalauswertung	Eine Verbesserung der Signalauswertung konnte wesentlich durch die theoretisch bekannten Signalcharakteristiken umgesetzt werden. Verbesserungsmaßnahmen: Kleine Anzahl an Auswertebandpassfenster, mechanische Versteifung der Messposition am Mitteltunnel, maximale Minimierung der Auslenkungsamplitude des Anregungsprofils.
AP5.2	Veröffentlichung der Ergebnisse	Wegen der technischen Innovation des Gesamtvorhabens und der sich andeutenden Vorreiterrolle der beteiligten Projektpartner, wurden die wesentlichen Ergebnisse im Rahmen von Schutzrechtsanmeldungen mit entsprechenden Offenlegungsschriften durchgeführt.
AP5.3	Technologietransfer zu den Kooperationspartnern	Intensive Workshop- und Messreihen mit den jeweiligen Partnern der Codierungs- oder Mechanikschwerpunkte hat den aktiven Technologietransfer innerhalb des Projektnetzwerks deutlich beflügelt und erlebbar gemacht. Die wesentlichen Ergebnisse wurden in regelmäßigen Status- und Abstimmungsgesprächen durchgeführt und mit zusammenfassenden Ergebnisfolien abgeschlossen.

3. Projektphase: Optimierte Körperschallerzeugung im Frontalcrash

AP1.3.3	Aufbau optimierter Prototypen	Aufbau des für den Rollbocktest konzipierten aCISS-Prototypens mit der kombinierten Integration von Fußgängerschutz und aktiver Körperschallerzeugung. Der Fahrweg des aCISS-Elements wird dazu mit einem Elastomer ausgefüllt, so dass in einem Fußgängeraufprall eine relativ weiche Federstruktur zur Verfügung steht und im Crashfall die gezielte Körperschallanregung erfolgen kann. Möglich ist dies durch die signifikant unterschiedlichen Impulsmassen der unterschiedlichen Unfallgegner.
AP1.3.4	Auswertung der zweiten Testphase	Die Auswertung der Rollbockcrashserie stellt die im Antrag geplante zweite Testphase dar mit dem wesentlichen Ergebnis: Körperschall kann gezielt im Crash geschwindigkeitsabhängig erzeugt werden. Die Fußgängeranforderungen lassen sich mit einem aus Stahl gefertigten aCISS-Verfahrelement in Kombination mit einem Elastomer wegen der zu hohen Eigenträgeit des Systems nicht realisieren. Hierzu muss ein Element aus Aluminium entwickelt werden.
AP1.3.5	Festlegung der besten Konstruktion	Zusammen mit Pendeltests am Prototypenprüfstand der Hochschule Ingolstadt, den FEM-Simulationen und einer 30 kHz High-Speed-Kamera, mit der die Bewegung der Abtastnadel bei einer Impactgeschwindigkeit von 16 km/h erstmals sichtbar gemacht werden konnte, ist die beste mechanische Realisierung eine Doppel-Sweep-Anregung, mit zwei über einen sog. Hasenohrhalter elastisch gelagerten Abtastnadeln, die durch ein entsprechendes Profil XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX geführt werden, vgl. Abbildung 9.

AP2.3.3	Entwurf möglicher Erkennungsalgorithmen	Erkennungsalgorithmen müssen deutlich einfachere Auswertungen und Rechenoperationen beinhalten als es bei der theoretisch unendlichen Rechenleistung in der versuchsnachgeschalteten Datenauswertung möglich ist: Spektrale Untersuchungen sind in einem Airbagsteuergerät nicht möglich. Das gefundene und realisierbare Optimum stellt eine Betragshüllkurvenbildung im Sensor noch vor der Digitalisierung dar, so dass die modulierte Sweep-Trägerinformation nicht verloren geht und mit geeigneter Bandpassfilterung im Steuergerät wieder extrahiert werden kann.
AP2.3.4	Bewertung der Algorithmen	
AP3.5	Crashtests der optimierten Prototypen	Mit großem Aufwand konnten die projektabschließenden Rollbockversuche auf einer VW-Crashbahn durchgeführt werden. Die speziell für diese Tests entwickelten Prototypen mussten neben der Körperschallerzeugung auch die Fußgängerschutzanforderungen erfüllen, so dass die Versuchsdurchführung zeitlich verschoben werden musste. Die Ergebnisse aus Sicht der Körperschallanregung sind dabei sehr positiv ausgefallen: Das entwickelte Erkennungskonzept der Crash- und Deformationsgeschwindigkeit ist linear und erlaubt den gezielten Rückschluss auf die mit dem Projekt gesuchte Geschwindigkeit v_0 !
AP5.4	Erschließung neuer Anwendungen	Mit dem Forschungsvorhaben konnte das wissenschaftlich-technische Alleinstellungsmerkmal Körperschall an der Hochschule Ingolstadt weiter ausgebaut werden. Konkrete weitere Vorhaben sind der Ausbau der Körperschallausbreitungssimulation, Erkennung von Hüftgelenksschäden an Implantaten, die Kombination aus Fußgängerschutz und Körperschallerkennung, Verteilte Körperschallsensoren im Fahrzeug.
AP5.5	Konzeption von Anschlussprojekten	

Tabelle 3: Soll/Ist-Vergleich der geplanten/erreichten Meilensteine.

5.2 Aufgabenfeld Projektabwicklung (AP0)

Die Zusammenarbeit mit den Projektpartnern basierte vorwiegend im persönlichen Austauschprozess in regelmäßigen Workshoptreffen auf Arbeitsebene und turnusmäßigen Abstimmungsgesprächen für die übergeordnete Projektentwicklung. Viele Arbeitspakete bedingen einen direkten Austausch am gemeinsamen Tisch, beispielsweise bei der Planung von Crashversuchen mit den dafür erforderlichen Versuchsaufbauten, Instrumentierung von Körperschallmesstechnik und Bereitstellung von Technologiedemonstratoren des aCISS-Crashsystems. Entsprechende mehrtägige Intensivworkshops wurden gemeinsam durchgeführt. Die Zusammenarbeit mit den Universitäten Magdeburg und Southampton verlief kooperativ und sehr erfolgreich mit regelmäßigen, mehrtägigen Wissenschaftlertausch für Messungen, Auswertungen und Ergebnisdiskussionen.

Die Bearbeitung der einzelnen Arbeitspakete wurde zudem regelmäßig in Teamrunden im wöchentlichen Turnus abgestimmt, um ein schnelles und qualifiziertes Vorankommen sicher zu stellen.

5.3 Arbeitsbereich Mechanische Realisierung (AP1)

Die Entwicklung des aCISS-Elements, entgegen der letztlich gefundenen Lösung des geführten Nadelkonzepts zur Strukturanregung, wurde mit der konzeptionellen Methode abscherender Bolzen begonnen.

Hierfür wurden hochfeste Stahlbolzen durch einen Stößel bei Hinderniskontakt der Kollisionspartner abgeschert bzw. gebrochen, so dass die bruchbedingte hohe freiwerdende Energie in Form von Körperschall an die Struktur abgegeben wurde. Der Stößel wurde dabei in dem Fußgängerschutzelement integriert, welches ca. 50 mm Raum zwischen eigentlicher Crashrahmenstruktur (Querträger, vgl. Abbildung 3) und Kunststoffstoßfänger der Fahrzeugaußenhaut hat. Der Stößel lässt sich sehr gut durch Schiebehülsen in einem Querträger, wie in Abbildung 4 dargestellt, führen und kann gezielt auf einfach einschweißbare Stahlstifte einwirken.

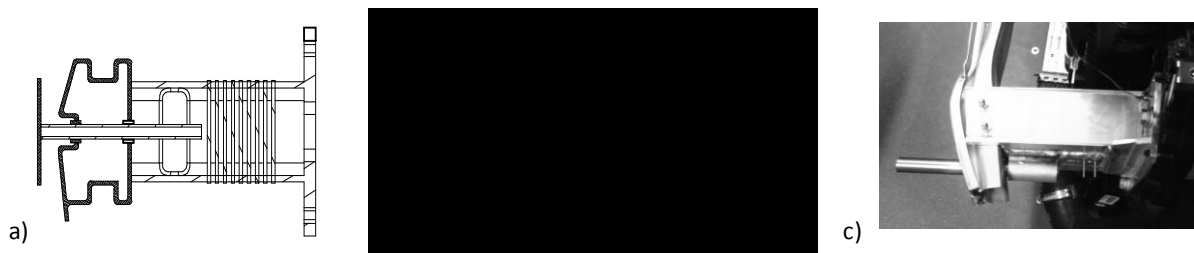


Abbildung 4: Erster Konzeptansatz der Ausgestaltung eines aCISS-Elements: a) Konzeptkonstruktion, b) CAD-Umsetzung durch Konstruktionsabteilung der OEMs, c) konzeptioneller Versuchsaufbau an Fahrzeugkarosserie im Körperschalllabor der Hochschule Ingolstadt.

Die ersten Labor- und Validierungsversuche im Körperschalllabor der Hochschule Ingolstadt, haben die Möglichkeit, geschwindigkeitsabhängige Impulse zu erzeugen, bestätigen können. Jedoch ist es nicht möglich, durch die Übertragungstrecke mit flächigen Blechstrukturen diese Information an einer der typischen Steuergerätepositionen auf dem Fahrzeugmitteltunnel zu detektieren bzw. so auszuwerten, dass auf die Stiftabschergeschwindigkeit geschlossen werden kann. Dünne Bleche übertragen Körperschall vorwiegend als Biegewelle, deren Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Frequenz abhängt. Da eine impulsartige Anregung theoretisch das gesamte Frequenzspektrum anregt, überlagern sich die Einzelinformationen bereits nach sehr kurzem Abstand zur Entstehungszone.

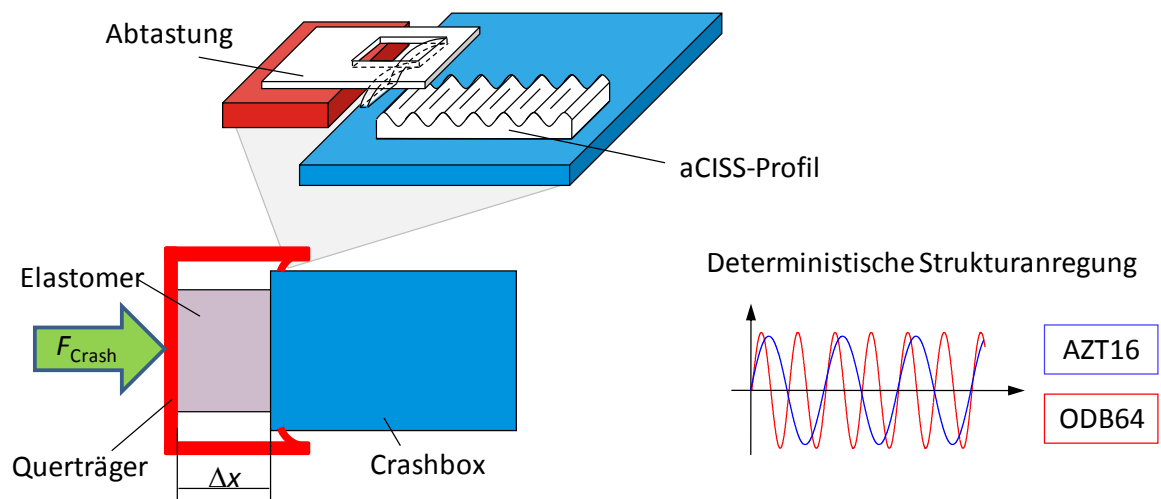


Abbildung 5: Wichtiger Innovationsschritt der mechanischen Umsetzung des aCISS-Elements: Statt einer stiftschersenden Grundkonzeption wird eine Körperschallanregesequenz über eine mechanische Ausgestaltung des abzutastenden Profils realisiert.

Statt die Strukturangregung über Impulsfolgen zu erzeugen, hat der Innovationsschritt, genau eine Frequenz zu übertragen, damit der dispersive Biegewelleneinfluss eliminiert werden kann, die wesentlichen

weiteren Arbeiten beeinflusst. Abbildung 5 zeigt das Konzept der Körperschallerzeugung. Die Gestalt des Querträgers, der von der Crashbox mit einem Elastomer getrennt ist, stellt eine weitere wichtige Innovation dar. Dieser Konstruktionsvorschlag von Benteler erlaubt es, das klassische Fußgängerblech bzw. den Fußgängerschaum einzusparen, was wertvollen Bauraum im Vorderwagen für neue Designansätze schaffen würde, da das Elastomer bei Zusammendrücken die Eigenschaften des Fußgängerschaums übernehmen könnte. Gleichzeitig erlaubt es für die Anbringung eines aktiven Körperschallelements die Ausnutzung des Fahrwegs von ca. 45 bis 50 mm.

Mit einer geeigneten Anregestruktur muss es so möglich sein, gezielt eine geschwindigkeitsabhängige Frequenz auf die Fahrzeugstruktur aufzugeben. In Abbildung 5 sind die exemplarischen, aber sehr wichtigen Lastfälle AZT und ODB mit ihren jeweiligen Deformationsgeschwindigkeiten von $v_{AZT} = 16 \text{ km/h}$ und $v_{ODB} = 64 \text{ km/h}$ dargestellt. Da aber im Fahrzeug im Alltagsbetrieb niederfrequente Störungen auftreten, die beispielsweise über die Räder oder andere bewegte Teile in die Karosserie eingeleitet werden, muss das durch das aCISS-Element erzeugte Nutzsignal zur Übertragung durch die Karosserie im höheren Frequenzbereich angesiedelt sein. Den Grundkonzepten zur Erzeugung gezielter Körperschallsequenzen entsprechend, wurden drei weitere Methoden intensiv untersucht, mit denen sich diese gezielte Strukturanregung realisieren ließe. In Abbildung 6 wird das Konzept angeschlagener Biegeeigenschwinger mit deren charakteristischen Biegeeigenfrequenzen aufgezeigt. Abbildung 7 zeigt das Abtasten eines Zahnstangenprofils mit optimierten Abtastflanken und Abbildung 8 beinhaltet das letztlich umgesetzte Konzept der geführten Nadel, dessen Körperschallanregegüte im Zeitverlaufdiagramm eindeutig ist.

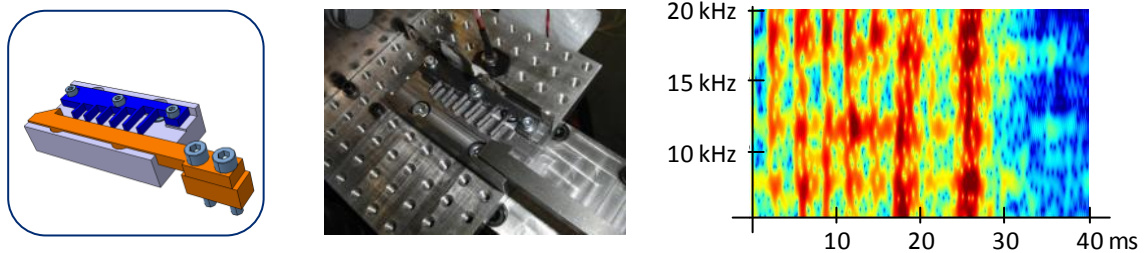


Abbildung 6: Zeitdiskretes Anschlagen gezielter Eigenfrequenzen: Impulsartige Strukturanregung durch sprunghafte Entlastung, zeitliche Trennung einzeln angeschlagener Biegeschwinger wegen mechanischer Kopplung nicht möglich. Das Anschlagen entspricht einer impulsartigen Anregung und kann im Sonogramm (rechts) als horizontale Linie gefunden werden.

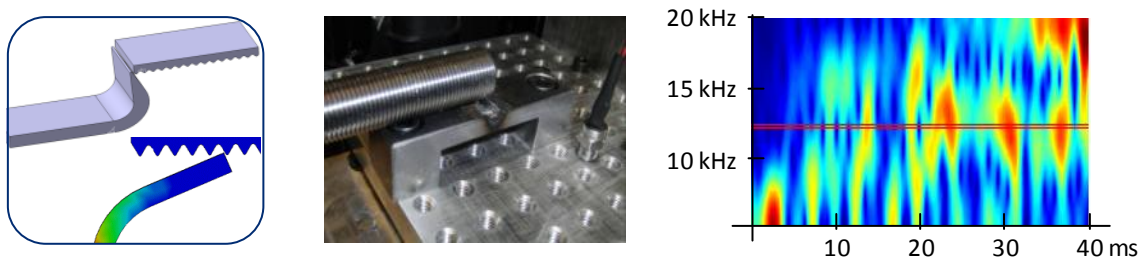


Abbildung 7: Zahnstange gegen festes Sinusprofil: mechanische Herausforderung stellt das Überspringen einzelner Profil-/Codierungselemente dar; auch hier häufig beobachtbare impulsartige Anregung, so dass eine gute Kopplung/Führung des Profils und Abtastelements notwendig wäre.

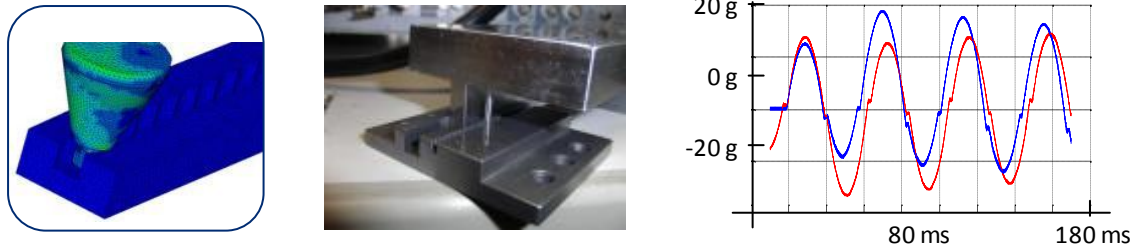


Abbildung 8: Bewegter Stift in einem Sinusprofil – Schallplattenanalogie der geführten Nadel: Führung einer Abtastnadel durch codiertes Rillenprofil; Ideale Anregung bei geringer Geschwindigkeit sehr gut darstellbar. Vorspannung bestimmt erreichbare Amplitude. Sowohl Simulationen als auch die Konzeptuntersuchungen bestätigen das Verfahren in seiner Anregegüte.

Entsprechend der Ergebnisse der vier Konzeptuntersuchungen: Scherstifte, Biegeschwinger, Zahnstangenprofil und geführte Nadel, konnte die zur Plattennadel analoge Methode als vielversprechendste Möglichkeit identifiziert werden, um gezielte Anregeinformationen auf die Fahrzeugstruktur aufzuprägen. Diese besteht aus vielen Einzelteilen komplexer Geometrie mit Kanten und Verbindungen, die vorwiegend dünnwandig ausgeprägt sind. In diesem inhomogenen Ausbreitungsmedium werden zwangsweise Biege- wellen angeregt, welche die dominierende Wellenart darstellen. Neben der bereits ausgeführten disper- siven, frequenzabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Biege- wellen, stellen auch Mehrfachreflexio- nen und das Zusammenwirken mehrerer paralleler Ausbreitungspfade weitere signalverzerrende Effekte dar, die sich mit einer geeigneten Codierung finden lassen müssen, vgl. hierzu AP2, Abschnitt 5.4.

Die konkrete Umsetzung in einem seriennahen Funktionsdemonstrator des aCISS-Elements erfolgte in Anlehnung an die ersten Konzeptzeichnungen in Abbildung 9 a) und konkreten Bauteilkonstruktionen Ab- bildung 9 b), die in reale Prototypen bzw. Technologiedemonstratoren umgesetzt wurden. Der Abtastarm, der in Abbildung 9 a) wie ein blechförmiges U oder auch wie zwei Hasenohren ausgeführt ist, hält die Abtastnadeln, und ermöglicht durch die Länge und Form der Hebelarme eine gezielte Einstellung der Gegenkraft bzw. Vorspannung, mit der die Nadel durch das gefräste Sinus-Profil in der Schiebehülse des Querträgers geführt wird. Mit großer Vorspannung steigt zwar die erzeugte Körperschallamplitude, aber auch die Gefahr, dass das filigrane Wellenprofil beschädigt wird.

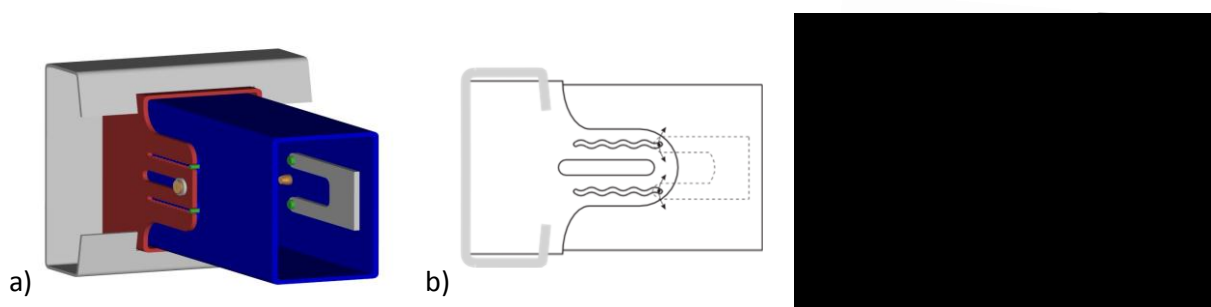


Abbildung 9: Ableitung konkreter Technologiedemonstratoren mit *Hasenohr*-Abtastnadeln, deren Form es erlaubt den Zielkonflikt zwischen hoher Vorspannung und Vermeidung einer hohen Profilabnutzung (spanendes Abtragen der ersten Prototypen hat die Entwicklung beschleunigt): a) Erste Konzept- skizze, die die Hasenohr-Abtastung verdeutlicht, b) abgeleitete Konstruktionszeichnung des end- gültigen Prototyps, der als Grundlage der gefertigten Baugruppen c) diente.

In der letzten Projektphase wurden die Arbeiten zur grundlegenden Gestaltung einer körperschallerzeu- genden Mechanik für den Einsatz im Frontbereich des Fahrzeugs auf Basis der Hasenohr-Nadel-Abtastung

abgeschlossen. Auf Basis der sehr vielversprechenden Ergebnissen der ersten Technologiedemonstratoren wurden die Anforderungen für eine konkrete Umsetzung in enger Abstimmung mit den Partnern beschrieben, um einer realen Umsetzung näher zu kommen: Das aCISS-Element muss möglichst einfach und robust aufgebaut sein. Die Körperschallanregung darf nicht vom Fahrzeugalter und -verschmutzungsgrad abhängig sein. Die entsprechende Umsetzung und Weiterentwicklung zu dem seriennahen Stand ist nachfolgend in Abbildung 10 dargestellt.

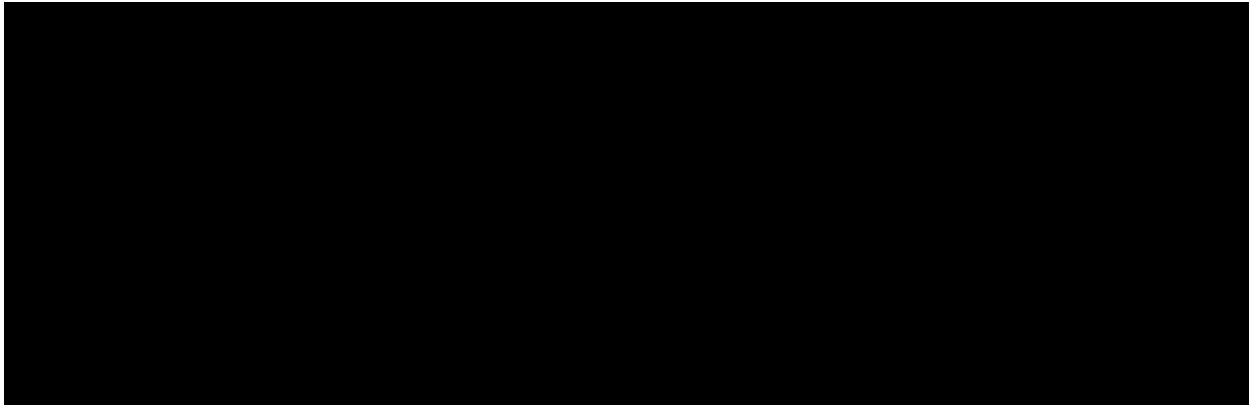


Abbildung 10: Fertige Konstruktion des optimierten aCISS- Technologiedemonstrators mit dem Biegequerträger (grün) rechts) Erster Versuchsaufbau zur Bewertung der Funktionsweise im Labor an der Hochschule Ingolstadt mit entsprechender Körperschallreferenzmesstechnik

Die Körperschallanregung bzw. das Auswertekriterium muss proportional zur Crashgeschwindigkeit sein. Das System muss kostengünstig sein und darf nicht schwerer als bestehende Konstruktionen sein. Nach mehreren Anpassungs- und Optimierungsschleifen konnten aCISS-Elemente prototypisch aus Aluminium gefertigt werden, um auch für den Einsatz im Crashversuch verwendet werden zu können. Die Funktionsweise und Absicherung der Technologiedemonstratoren konnte im Fallturmtest und in der letzten Projektphase auch in realen Rollbockcrashversuchen bestätigt werden.

5.4 Arbeitsbereich Codierung und Algorithmik (AP2)

Bereits bei der Untersuchung der mechanischen Umsetzung einer gezielten Strukturanregung, hat sich gezeigt, dass Signalfolgen bestehend aus breitbandigen Einzelereignissen, wie sie anfänglich für die Erzeugung durch das mechanische aCISS-Element vorgesehen waren, über die Fahrzeugstruktur verschliffen werden. Die sequenziellen Einzelereignisse der Pulsfolge überlagern sich zu einer komplizierten Zeitfunktion. Diese Eigenschaft grenzt eine Vielzahl von möglichen Signalen und Verarbeitungsmethoden aus. Breitbandige Signale eignen sich demnach kaum für die Anwendung bei aCISS. Rechtecksignale und Impulse weisen eine solche breitbandige Charakteristik auf und sind demzufolge ungeeignet. Sinussignale und ähnlich bandbegrenzte Signale lassen sich dagegen aufgrund ihres im Idealfall aus einer Frequenz bestehenden Grundtons in realen Strukturen immer noch sehr gut wiederfinden. Entsprechend wurden die mechanischen Konzepte aufgebaut, vgl. Abschnitt 4.3.

In der Fahrzeugvorderwagenstruktur erfolgt durch das mechanische aCISS-Element die gezielte Erzeugung einer oder mehrerer schmalbandiger Schwingungssequenzen beispielsweise in Form einer harmonischen Schwingung, deren Grundfrequenz abhängig von der relativen Deformationsgeschwindigkeit in der Anfangsphase des Crashes ist. Die Signale können an unterschiedlichen Orten in die Struktur eingekoppelt werden. Im Fall mehrerer Signalen können sich diese als Resultat des mechanischen Verhaltens der Struktur additiv überlagern. Da die relative Geschwindigkeit für Kollisionspartner bzw. Hindernisse mit nähe-

rungsweiser gleicher effektiver Steifigkeit konstant ist, kann die Frequenz der Anregung in der betrachteten Anfangsphase des Crashes und der für die Erzeugung zur Verfügung stehenden Deformationsstrecke von ca. 50 mm ebenfalls als konstant angenommen werden. Die Frequenz der Anregung lässt sich auch über die Zeit bzw. abhängig vom Deformationsweg variabel gestalten (Sweep- bzw. Chirp-Signale). Abbildung 11 zeigt exemplarisch das auch später mechanisch umgesetzten Verfahren des gegenläufigen Doppel-Sweeps.

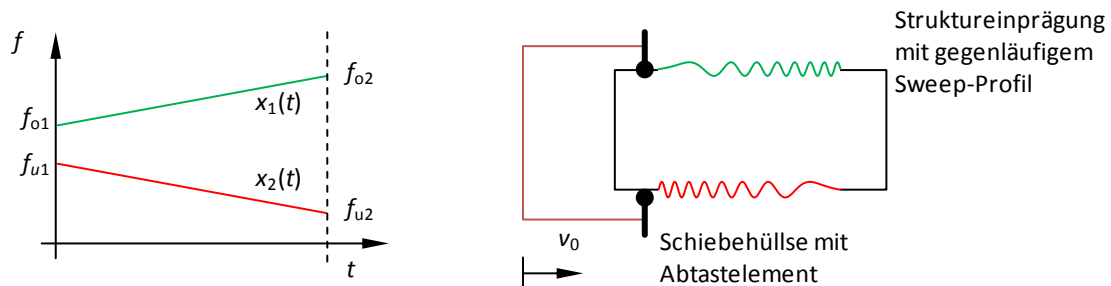


Abbildung 11: Prinzipielle Struktur-anregung nach dem gegenläufigen Doppel-Sweep-Ansatz: Beginnend mit zwei unterschiedlichen Startfrequenzen f_{o1} und f_{u1} steigt die Frequenz des oberen Sweeps auf die Frequenz f_{o2} an und der untere Sweep fällt auf f_{u2} ab.

Die Fahrzeugkarosserie wirkt als Übertragungsmedium der sich ergebenden Körperschallwellen. Im Airbag-Steuergerät oder an anderer geeigneter Stelle an der Karosserie des Fahrzeugs erfolgt die Messung der Signale. Dort sitzt ein geeigneter Sensor, der die Strukturvibrationen bzw. den Körperschall aufnimmt. Anschließend erfolgt deren Verarbeitung und Auswertung mit dem Ziel, die relative Crashgeschwindigkeit v_{rel} zu extrahieren. Dazu soll in einer Weiterentwicklung der Sensorzelle die Vorverarbeitung eventuell bereits eingebaut werden. Innerhalb des Projekts konnte die prinzipielle Signalverarbeitungskette für eine entsprechende Sensorzelle spezifiziert werden. Durch die Sensorvorverarbeitung kann bereits bei der Abtastung der Körperschallinformation eine Datenreduktion vor der Übertragung in die ECU bzw. in den Controller des Airbag-Steuergerätes durchgeführt werden.

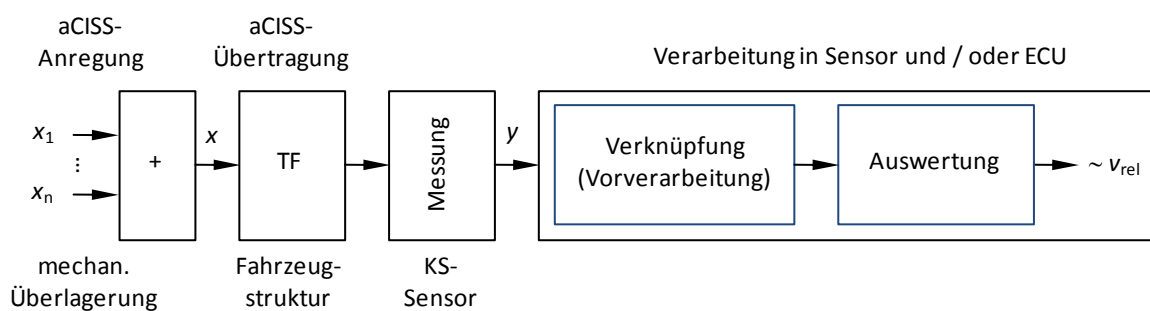


Abbildung 12: Einkopplung geschwindigkeitsabhängiger Signale durch das aCISS-Element: mechanische Überlagerung und Ausbreitung der Information als mechanische Wellen über die Fahrzeugstruktur, Messung und Rückgewinnung der relativen Crashgeschwindigkeit v_{rel} .

Für die beiden Blöcke Vorverarbeitung und Auswertung aus Abbildung 12 sind in Kombination mit unterschiedlichen Anregungsarten mehrere Verfahren denkbar, von denen im Folgenden einige als Realisierungsbeispiele aufgeführt werden.

Vorverarbeitung mittels Demodulation: Die Anregung wird durch eine oder mehrere harmonische Schwingungen gebildet. Die nicht identischen Frequenzen f_1 und f_2 der Anregungen x_1 und x_2

sind dabei proportional zur relativen Crashgeschwindigkeit v_{rel} . Dadurch sind die erzeugten Geschwindigkeitsinformationen direkt proportional zur Anregfrequenz. Der Zusammenhang gilt prinzipiell auch bei der Erzeugung einer Sweep-Folge. Im nächsten Schritt wird das Sensorsignal quadriert. Dieser Schritt stellt den wesentlichen Innovationssprung bei der Auswertung der über das Fahrzeug ausgebreiteter Körperschallinformationen dar. Die Quadratur entspricht im Spektralbereich einer Signalfaltung, d. h. einer Multiplikation der Spektralanteile des Signals. Das führt bei einer Sinus- bzw. Sweep-Funktion zur Verdoppelung der Signalanteile. Es entsteht die doppelte und die halbierte Frequenzinformation ausgehend von der Anregfrequenz, beispielsweise f_1 : Aus f_1 wird $\frac{1}{2} f_1$ und $2 f_1$.

Dadurch wird es möglich, eine hohe Trägerfrequenz, die für eine schnelle Signalübertragung erforderlich ist, in einen durch das Steuergerät abtastbaren Bereich zu transformieren, ohne die Signalinformation, hier exemplarisch f_1 , zu verlieren. Durch einen anschließenden Tiefpassfilter kann der hochfrequente Anteil $2 f_1$ eliminiert werden. Der niederfrequente Anteil $\frac{1}{2} f_1$ kann problemlos an das Steuergerät übertragen und dort ausgewertet werden. Unter Nutzung des aufgrund der mechanischen Realisierung der Anregung festen und bekannten Verhältnisses zwischen den Trägerfrequenzen lässt sich auf die Crashgeschwindigkeit zurückschließen. Bestandteil der Vorverarbeitung kann je nach Anwendung und Signalübertragungsgüte auch eine Filteroperation, beispielsweise eine weiterführende Bandpassfilterung des Signals vor der Demodulation sein.

Inverse Filterung als zusätzliche Vorverarbeitung: Optional lässt sich mit der inversen Filterung eine zusätzliche Vorverarbeitungsstufe zur Unterdrückung der Transfereigenschaften der Fahrzeugkarosse anwenden. Dabei wird die Transferfunktion $H(\omega)$ von dem aCISS-Element zum Ort der Messung als bekannt vorausgesetzt. Die Impulsantwort des Systems lässt sich durch inverse Fourier-Transformation mit $h^{-1}(t) = F^{-1} \{H(\omega)\}$ gewinnen. Mit der diskreten Faltung in den Grenzen $\pm T$ kann unter vorheriger Diskretisierung der Impulsantwort das Anregungssignal zurückgewonnen werden. Diese lässt sich mit den aufgezeigten Methoden verarbeiten und entsprechend in die gesuchte Crashgeschwindigkeit umrechnen.

Auswertung mittels Aufteilung in Frequenzbänder: Das vorverarbeitete Signal lässt sich im relevanten Frequenzbereich durch Bandpassfilterung in mehrere Pfade aufteilen. Durch Verhältnisbildung zwischen den Bändern und Auswertung mit einer einfachen Logik ist die Klassifizierung möglich. Für höhere Anforderungen an die Auflösung lässt sich die Anzahl der Bänder unter Verringerung der Breite erhöhen. Die Berechnung kann sowohl als Vorverarbeitung im Sensor als auch im Controller erfolgen.

Auswertung mittels Nullstellenzählung: Eine Möglichkeit zur Realisierung der Bestimmung der informationstragenden Frequenz im Steuergerät besteht in der Auswertung der Nullstellen des Signals. Diese kann auf ein bandpassgefiltertes Signal angewendet werden.

Auswertung mit der Frequenz-Amplituden-Transformation fA-T: Ausgehend von einer Cosinus Anregung $x(t)=\cos(\omega t)$ durch eine harmonische Schwingung oder ein Sweep-Signal kann an der Messposition ein Signal $x(t)=\cos(\omega t + \phi)$ gemessen werden. Im Falle des Sweeps ist ω eine Funktion der Zeit bzw. des Deformationsweges. Durch Ableitung von y findet sich ein Signal, dessen Amplitude von der Frequenz der eingekoppelten Schwingung abhängt. Die Amplitude lässt sich zur Bestimmung der Anregungsfrequenz und damit von v_{rel} verwenden. Durch Bildung des Betrags und anschließender Tiefpassfilterung des Signals lässt sich eine Datenreduktion erreichen,

mit deren Hilfe eine einfache Auswertung der frequenzproportionalen Amplitude im Steuerg r t möglich ist. Das Verfahren lässt sich optional mit der inversen Filterung als zusätzliche Vorverarbeitungsstufe zur Unterdrückung der Transfereigenschaften der Fahrzeugkarosse anwenden.

Auswertung durch Nutzung der Phaseninformation der Anregung: An der Messposition wird ebenfalls ein Cosinus-Signal gemessen. Durch Manipulation der Phase des Signals, beispielsweise mit einer Phasenschieberkette, durch Addition einer Phasenverschiebung von beispielsweise $\phi = \frac{1}{2} \pi$ lässt sich ein zweites Signal erzeugen. Im Fall von $\frac{1}{2} \pi$ wird aus dem Cosinus- ein Sinus-Signal. Werden beide Signale als Real- und Imaginärteil einer komplexen Zahl aufgefasst, so entspricht der Phasenwinkel der komplexen Zahl genau dem Argument der Winkelfunktion: $\phi = \omega t$. Durch Ableitung des Winkels ergibt sich entsprechend die Winkelfrequenz ω direkt, so dass sich durch die berechnete Winkeländerung direkt auf die Frequenz und damit auf die relative Geschwindigkeit v_{rel} schließen lässt.

Alle Auswerteverfahren sind bei den durch Modulation und nachfolgende Mischung und Quadratur gewonnenen Signalen besonders einfach an dem niederfrequenten Signalanteil durchführbar und eignen sich alternativ oder ergänzend zur Bestimmung der Aufprallgeschwindigkeit, welche wiederum als Maß der Crasheschwere verwendet und, in Abhängigkeit davon, zu Schutzeinrichtungen für Insassen und/oder Kollisionsgegner werden können.

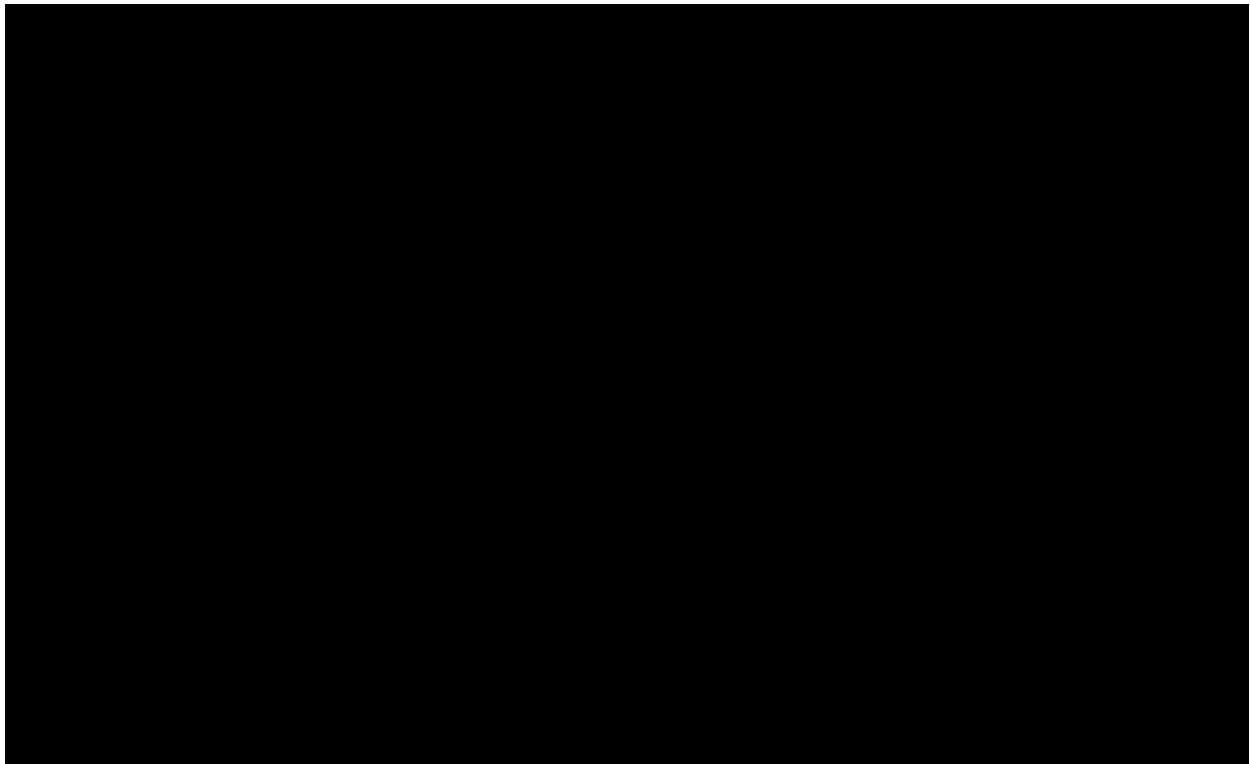


Abbildung 13: Vorgehensweise bei der Bestimmung der relativen Crashgeschwindigkeit des aCISS-Elements: Die Frequenz-Amplituden Transformation fA-T vom Rohsignal über die nichtlineare Frequenzmodulation durch Filterung und Quadrierung bis hin zur, zur Geschwindigkeitsinformation proportionalen, Hüllkurvensteigung.

Mit diesen Auswerteverfahren wurden die umfangreichen Validierungs- und Prototypenfallturmuntersuchungen ausgewertet, da keines der Verfahren zur Demodulation der aCISS-Information an den verschiedenen Messstellen signifikant bessere Ergebnisse liefern konnte. Durch intensive Abstimmungen mit den

Experten zur praktischen und theoretischen Signalverarbeitung im Kooperationskonsortium wurde die fA-T Methode, die Frequenz-Amplituden-Transformation, als Mittel der Wahl bestimmt, da sich deren Auswerteschritte am besten in einer realistischen und umsetzbaren Sensorzelle darstellen lassen. Dieser Schritt sollte auch eine anvisierte Serienumsetzung der Technologie unterstreichen. Anhand der Auswertung eines späten Prototypenstands sind in Abbildung 13 alle umzusetzenden Signalverarbeitungsschritte nacheinander dargestellt.

Bei der mathematischen Beschreibung und darauf aufbauenden Signalverarbeitungsschritten musste im Besonderen die begrenzte Rechenzeit der später zu verwendenden Airbagsystem-Hardware berücksichtigt werden. Wo es am Desktop-PC ohne weiteres gelingt, Frequenzspektren zu bewerten, kann dies auf einem, einige Größenordnungen langsameren Fahrzeugsteuergerät nicht in Echtzeit durchgeführt werden. Entsprechend dieser Randbedingungen stellte die Beschreibung einer geeigneten Auswertemethode eine große Herausforderung dar. Auch hier setzt die Lösung des Zielkonflikts auf die Verwendung der neuen digitalen Körperschallsensorzelle von Continental, die die nichtlineare Hüllkurvenbildung direkt anbietet und das Steuergerät nur noch die Hüllkurvensteigung ermitteln muss. Die Auswertung im Steuergerät selber kann gemäß Abbildung 14 abschließend sehr einfach erfolgen: Ermittlung der Hüllkurvensteigung und anschließende Geschwindigkeitsbewertung des deformierenden Fahrzeugvorderwagens, so dass die Anforderung, ein einfaches Kriterium für eine Crasherkenntung zu generieren, erfolgreich abgeschlossen und dargestellt werden konnte.

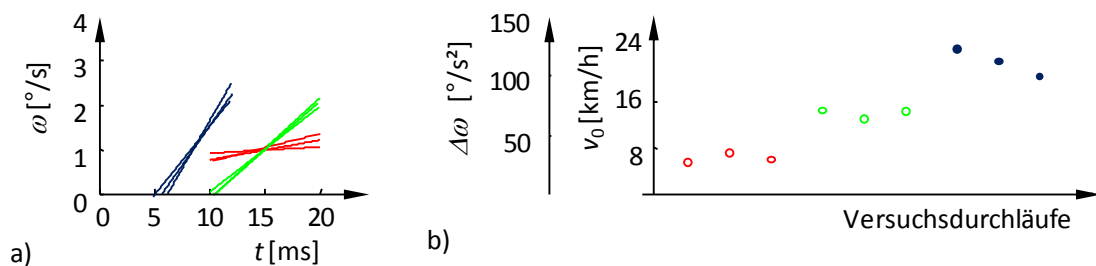


Abbildung 14: Auswertung der Hüllkurvensteigung nach Anwendung der fA-T-Frequenz-Amplituden Transformation des Doppel-Sweeps bei Fallturmversuchen verschiedener Geschwindigkeit. [REDACTED]

Für die Bewertung der Praxistauglichkeit der entwickelten Codierungsverfahren, der zugehörigen Algorithmen und der zur Messung im späteren Fahrzeugeinsatz verwendeten Airbagsystemhardware musste abschließend der Gesamtverbund in Fahrzeugcrashtests untersucht werden. Die entsprechende Versuchsserie wurde bereits oben unter dem Namen Rollbockversuch eingeführt. Die gute grundsätzliche Eignung des Gesamtsystems aCISS ermöglichte den Aufbau und die Durchführung dieser wichtigen Testserie bei Volkswagen. Eine abschließende Beurteilung der Gesamtwirkkette von der Geschwindigkeitsmodulation über das aCISS-Element hin zur Auswertung mit einer weiterentwickelten Körperschallsensorzelle mit integrierter Signalverarbeitung erfolgte in dem Arbeitspaketumfeld AP3, vgl. Abschnitt 0.

5.5 Arbeitsbereich Validierung und Test (AP3)

Der wesentliche Versuchsaufbau der Validierungs- und Testphase umfasste, nach den ersten einfachen Laboraufbauten, einen mit Benteler gemeinsam entwickelten Prototypentestschlitten. Dieser erlaubt es die unterschiedlichen aCISS-Grundkonzepte auf einem verfahrenbaren Querträgerschiebelement aufzubauen und systematisch direkt am Fahrzeug zu validieren, vgl. Abbildung 5. Mit dieser aCISS-nahen Kon-

zeptvalidierungsplattform, dargestellt in Abbildung 15, war es möglich, die aCISS-Grundkonzepte Biegeschwinger, Stiftscherung, Profilabtastung und geführtes Nadelkonzept an einer Fahrzeugstruktur mittels Pendelimpaktor unter realitätsnahen Bedingungen zu bewerten.

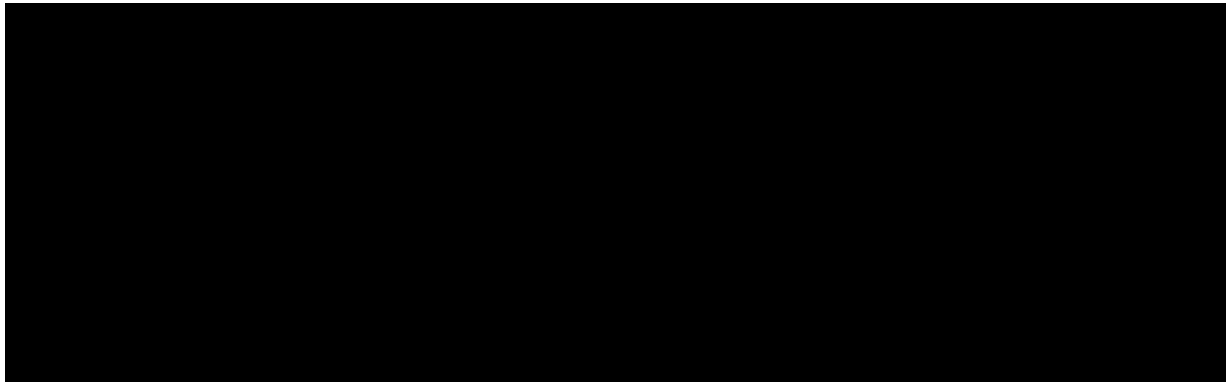


Abbildung 15: Variable Laborcrashbox zur Funktionsmustervalidierung der aCISS-Konzeptstudien: Der Konzeptstudienhalter kann mit der Anschraubplatte an die Crashboxaufnahme der beiden [REDACTED] montiert werden und ermöglicht über zwei flexible Flanschplatten die Untersuchung der aCISS-Konzeptstudien.

Mit der variablen Konzeptstudienaufnahme aus Abbildung 16 konnte der in Abschnitt 5.3 erwähnte Vorteile der geführten Plattennadel ebenfalls im Vergleich der Sonagramme aus Abbildung 6 bis Abbildung 8 deutlich herausgearbeitet werden. Die horizontalen Linien entsprechen den hier erzeugten Sinusfrequenzen bei der jeweiligen Crashgeschwindigkeit. Mit steigender Geschwindigkeit lässt sich auch die wachsende Beschleunigungsphase des aCISS-Verschiebeschlittens beobachten.

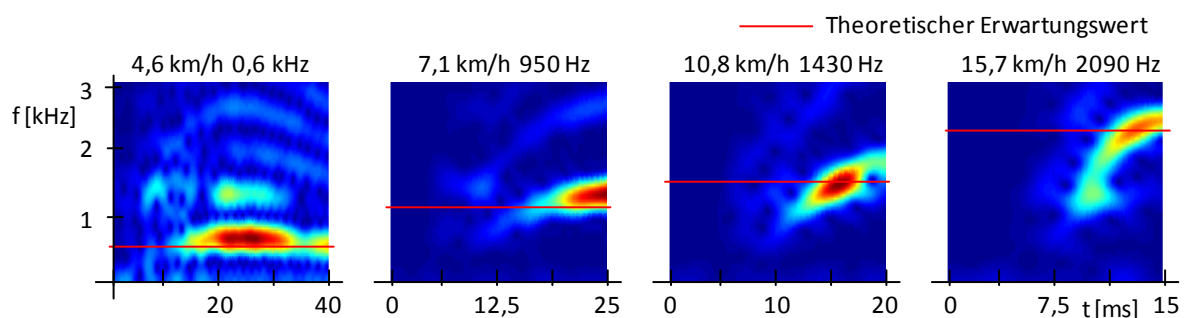


Abbildung 16: Erfolgreicher Nachweis des gezielten Körperschall unter Verwendung einer Sinusanregung, so dass gezeigt werden kann, Körperschall lässt sich mit einem Plattennadelkonzept am Fahrzeug erzeugen und auf die Rahmenstruktur aufgeben.

Das rechte Sonagramm in Abbildung 16 konnte nicht mehr durch den Pendelversuch am Fahrzeug realisiert werden, da die Pendelstange mit 1,4 m maximal 10 km/h reproduzierbar darstellen kann. Um auf die aus der Crashmechanik wichtige Impactgeschwindigkeit von 16 km/h zu gelangen, wurden verschiedene Fallturmeinrichtungen der Projektpartner Continental und Benteler verwendet. Abbildung 17 zeigt den Fallturm von Continental, der in seiner ursprünglichen Form für das Testen von Fußgängerbeinimpactoren konzipiert wurde, hier um die Körperschallmesstechnik und vertikal aufgestellten Konzeptstudienprototypen erweitert.

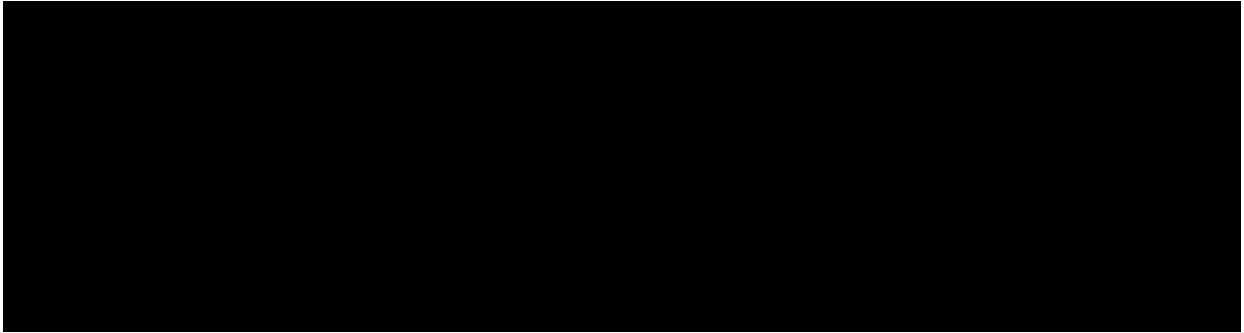


Abbildung 17: Exemplarischer Versuchsaufbau aus den Validierungstest am Fallturm Mitte der zweiten Projektphase zur Findung des besten Mechanismus zur Strukturanregung. Der Fallturmeinsatz ist der notwendigen Erhöhung der Impactgeschwindigkeit auf 16 km/h geschuldet.

Die Variation und vor allem die Optimierungsschleifen bei der Findung der optimalen Auslenkungsamplitude der geführten Nadel sowie der Länge der Hasenohrenstifthalter, erforderte eine Teilautomatisierung der Testdatenauswertung. Abbildung 18 zeigt, wie sich im jeweiligen Testfall die Nutzinformation im Zeitbereich, Spektralbereich und im Zeit-Spektrum-Verlauf, dem sogenannten Sonagramm, darstellen.

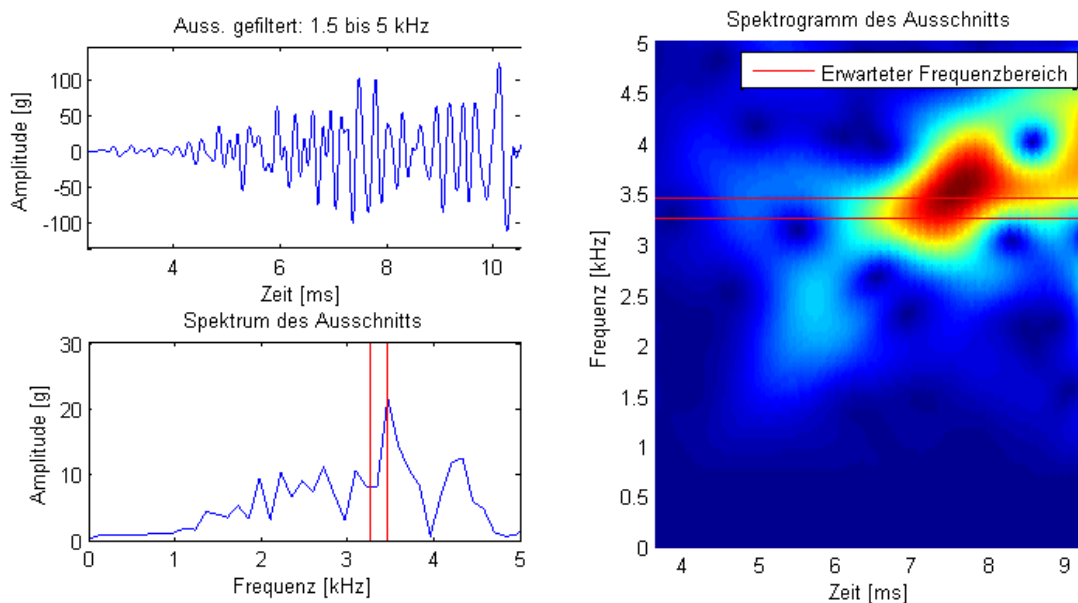


Abbildung 18: Auszug aus den Validierungsversuchen des Plattennadelkonzepts im Fallturm auf dem Versuchsträger mit einer halbautomatisierten Signalauswertung zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit von Testergebnissen zwischen verschiedenen Messreihen.

Die Bewertung der Anrege- und Umsetzungsgüte der verschiedenen Parametervarianten erfolgte nach dem Korrelationsprinzip der idealen und der realen, an der Entstehungszone aufgezeichneten, Messsignale, Abbildung 19. Aus der gemessenen Körperschallbeschleunigung wird auf die real abgetastete Geometrie geschlossen und mit der idealen Form verglichen. Die Kreuzkorrelation bietet einen mathematischen Zugang für eine Objektivierung der Güte- und Bewertungsfunktionen.

Nach umfangreichen, kooperativ abgestimmten Vorbereitungen der Rollbockversuche, konnten in der letzten Projektphase die optimierten Technologiedemonstratoren in den Rollbockversuchen getestet werden.

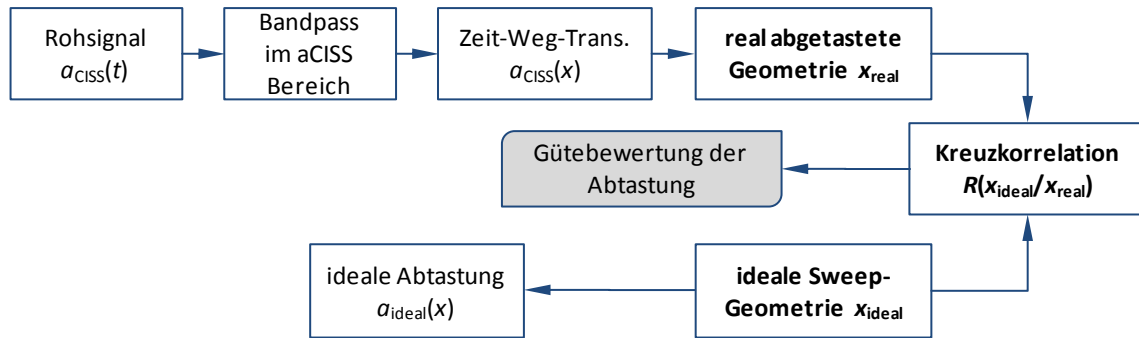


Abbildung 19: Verfahren zur Objektivierung der Auswertelgorithmen durch Kreuzkorrelation der gesuchten Abtast-Geometrie, hier eine Sweep-Geometrie, mit der tatsächlich aufgezeichneten Form.

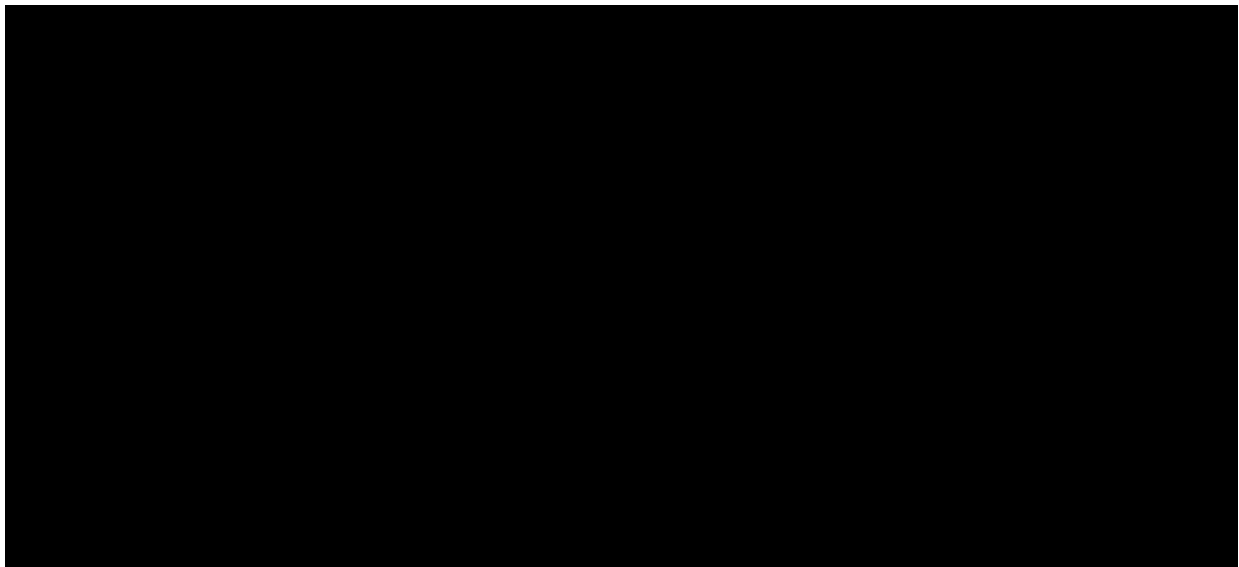


Abbildung 20: Versuchskonfiguration der Rollbock-Versuche auf der Crashanlage von Volkswagen mit dem verbauten, im Berichtszeitraum optimierten aCISS-Crashelement; neben dem Aufbau des Versuchsträgers ist auch die jeweilig verwendete Barriere zu erkennen.

Die Testreihenfolge wurde so gewählt, dass der Verbrauch an Fahrzeugrohkarossen möglichst gering blieb; [REDACTED]

[REDACTED]. Die Versuche selbst und deren Vorbereitung wurden in intensiver Abstimmung mit und bei Volkswagen auf der werkseigenen Crashbahn durchgeführt.

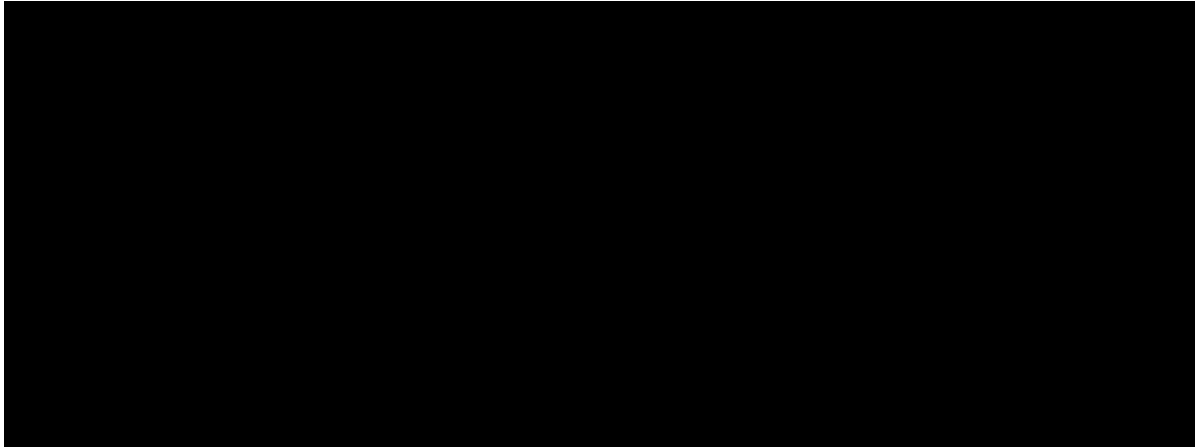


Abbildung 21: Auswertemethode der Rollbockversuche auf der VW-Crashbahn. Die Variation der Geschwindigkeit bis zu 40 km/h erlaubte erstmals ein Testen hoher Geschwindigkeiten über der AZT Geschwindigkeit von 16 km/h. In der Beschleunigungsphase des aCISS-Elements wird die Datenaufzeichnung initialisiert und in dem Auswertebereich, bei näherungsweise konstanter Verfahrensgeschwindigkeit des aCISS-Elements, erfolgt die Datenanalyse.

Bei den Rollbockversuchen konnten erstmals höhere Geschwindigkeiten über 16 km/h mit dem aCISS-Element betrachtet werden. Da die Ressource Crashtest sehr begrenzt ist, wurden die Versuche intensiv vorbereitet und mit umfassender redundanter Messtechnik ausgestattet. Dazu gehörten auch Wegpotentiometer zur Messung des Einschiebeverhaltens, um sicherzustellen, dass die Einschiebung und Beschleunigung des aCISS-Elements schnell genug abläuft, um die für die Signalauswertung hilfreiche konstante Deformationsgeschwindigkeit erreichen zu können. Abbildung 22 zeigt die Rollbockergebnisse an unterschiedlichen Messpositionen als in Abschnitt 5.3 beschriebenes Kriterium für die Unterscheidung von Crashlastfällen.

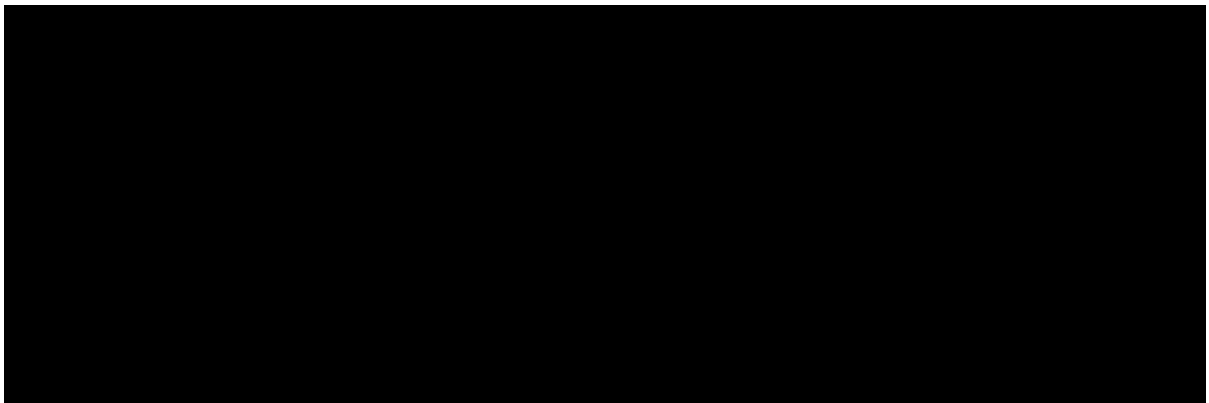


Abbildung 22: Zusammenfassende Ergebnisse der Rollbockuntersuchung unter Verwendung des aus der fA-T (Frequenz-Amplituden-Transformation) abgeleiteten Crashererkennungskriteriums $\frac{A_{max}}{v_{rel}}$. Das Kriterium ist direkt proportional zur relativen Crashgeschwindigkeit an allen Sensorpositionen!

Die wesentlichen ableitbaren Ergebnisse aus diesen abschließenden Untersuchungen erlauben zusammenfassend die Schlussfolgerung, dass sowohl eine Toleranzuntersuchung der Abtastraten- und Amplitudenvariationen erfolgreich verlaufen sind. Das Auswerteverfahren konnte in einem simulierten Steuergeräteumfeld unter Berücksichtigung realer Berechnungsparameter der Airbag-Steuereinheit bestätigt werden. Für die optimale Crashgeschwindigkeitsabschätzung kann zur Verbesserung der Auswertebereichserfassung eine Fensterung der Signalmuster durchgeführt werden, um den Bereich der Beschleunigung der Schiebevorrichtung des aCISS-Elements aus den Signalbewertungszeitfenstern gezielt auszuschließen.

5.6 Arbeitsbereich Technologietransfer (AP4)

Der Technologietransfer basierte größtenteils auf dem gemeinsamen Erarbeiten der Projektteilnehmer. Wichtige Beispiele sind hierbei das Grundkonzept der Signalmodulation sowie die Realisierung der serien-nahen Technologiedemonstratoren. Diese Workshops halfen Details zu den Anforderungen und aktuellen Ergebnissen zu diskutieren und neue Impulse in die Projektlandschaft zu bringen.

Vom Wissenstransfer profitierten auch regelmäßig Studierende, die in Form eines Studierendenprojekts, eines Praktikums oder einer Abschlussarbeit mit dem Projekt in Verbindung standen. Sowohl in den Sommer- als auch den Wintersemestern während der gesamten Projektlaufzeit wurden Studierendenprojekte, beispielsweise zur Störgeräuschunterdrückung bei der Auswertung von aCISS-Signalen, durchgeführt. Über dieses Studierendenprojekt erhielten interessierte Studierende auch die Möglichkeit, mit den Firmen in Kontakt zu treten, so dass bis heute neun konkrete Praxissemester bzw. Abschlussarbeitsthemen von den Industriepartnern wahrgenommen werden konnten. Die auf dem Thema arbeitenden wissenschaftlichen Mitarbeiter konnten bei den Studienprojekten ebenfalls eine Vielzahl an Aspekten für ihr Promotionsvorhaben nutzen und sich mit den bereits erarbeiteten Ergebnissen bei ihren zukünftigen Doktorvätern vorstellen.

6 Verwertung der Ergebnisse

6.1 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Gravierende Änderungen der Zielsetzung des Vorhabens waren trotz eingehender Konzeptänderung der Strukturanregemechanismen und deutlich höherem Testaufwand als ursprünglich anvisiert nicht notwendig. Die Realisierung des Verwertungsplans konnte bis zu Projektende wie geplant umgesetzt werden. Die drei abgeschlossenen Projektphasen Konzeption, Konstruktion und Optimierung konnten die Machbarkeit eines mechanischen aCISS-Elementes belastbar aufzeigen. Es konnte gezeigt werden, dass in einer Kollision von Fahrzeugen ein Körperschallsignal so erzeugt werden kann, dass das ableitbare Körperschallkriterium im Airbagsteuergerät proportional zur Deformationsgeschwindigkeit ist. So lassen sich konkrete Aussagen über die zu erwartende Crasheschwere ableiten. Mit dem optimierten aCISS-Technologiedemonstrator konnte eine seriennahe Fahrzeugintegration vorgestellt werden.

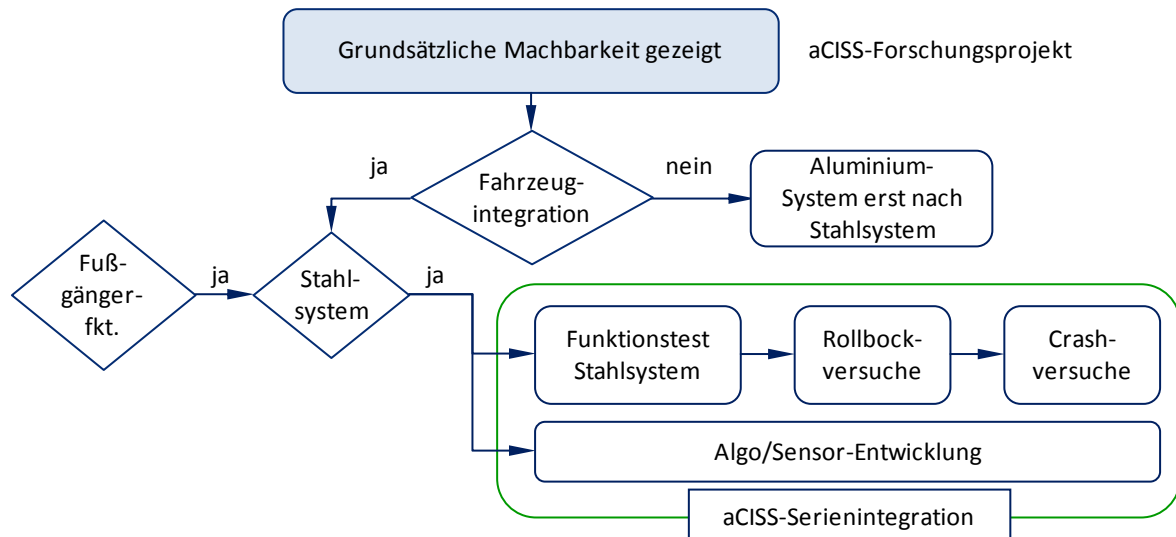


Abbildung 23: Verwertung der Ergebnisse des aCISS-Forschungsprojekts.

6.2 Fortschritte Dritter

Im Laufe des Projektes ist eine wichtige neue Erkenntnis durch Dritte publiziert worden. Das Projekt KESS einer innovativen Forschergruppe der Universität Bremen um Prof. Krieger erforscht Schadenserkenkung für Sharing-Fahrzeuge mittels Körperschall. Mit einem Netzwerk piezoelektrischer Körperschallsensoren und den notwendigen Elektronikkomponenten sollen Schadensereignisse detektiert, klassifiziert und zu Beweis Zwecken dokumentiert werden.²⁶ Der Fokus liegt hierbei nicht in der Bestimmung der Crash-Schwere, beziehungsweise der Kollisionsgeschwindigkeit, sondern in der möglichst genauen Bestimmung von Schädigungsarten, -ort und -zeitpunkt, insbesondere für kleinere Schädigungen, die bei visueller Inspektion eines Fahrzeugs nach Rückgabe nicht sofort auffallen. Diese Ereignisse treten vorwiegend im Stillstand oder in Parksituationen mit geringer Geschwindigkeit auf. Insofern unterscheidet sich der Forschungsgegenstand gravierend. Insgesamt lässt sich mit Blick auf die Forschungstätigkeiten der Universität Bremen folgendes zusammenfassen:

- Die für das vorliegende Projekt relevanten mechanischen Strukturkomponenten der Sicherheitskarosserie stehen nicht im Mittelpunkt der Arbeiten der Gruppe aus Bremen.
- Der wissenschaftliche Austausch zwischen den Arbeitsgruppen der Universität Bremen und der Hochschule Ingolstadt soll etabliert werden. Es fanden bereits erste Gespräche statt.
- Eine Kooperation im Bereich der Körperschalltechnologie im Fahrzeug befindet sich in Planung.

²⁶ Vgl. http://www.kess.uni-bremen.de/fileadmin/Download/Universitaet_Bremen__Mobilitaet_von_morgen_-_Elektronik_erfasst_automatisch_Fahrzeugbeschaedigungen.pdf (Stand: 06.12.2013)

7 Erfolgte Veröffentlichungen des Ergebnisses

Patente

Brandmeier, Thomas; Feser, Michael; Jacob, Susanne; Paggel, Jens; Saulich, Sigrid; Spannaus, Paul (2013): Device for detecting the characteristics of an impact into a motor vehicle. USA am 10.09.2013, US8532883 B2

Brandmeier, Thomas; Feser, Michael; Paggel, Jens; Spannaus, Paul; Saulich, Ingrid; Jakob, Susanne (2010): Vorrichtung zur Detektion der Charakteristik eines Aufpralls auf ein Kraftfahrzeug. DE am 07.01.2010, Veröffentlichungsnummer: DE102008020186.3

Brandmeier, Gerd; Feser, Michael; Brandmeier, Thomas; Lauerer, Christian (2012): Method for Detecting a Collision on Motor Vehicles Using at Least one Structure-Borne Noise Generating Device. EU am 14.03.2012, Veröffentlichungsnummer: EP2427350

Feser, Michael; Geigenfeind, Mario; Matlok, Daniel; Andres, Thorsten; Kohlhuber, Markus; Spannaus, Paul; Niese, Max; Groening, Torsten; Brandmeier, Thomas; Koestner, Johannes (2012): Vorrichtung zur Erzeugung einer Körperschallschwingung im Falle eines Zusammenstoßes eines Kollisionsobjekts mit einem Fahrzeug Weltweit am 02.08.2012, Veröffentlichungsnummer: WO2011035750

Promotionen

Lauerer, Christian (2010): Ein Beitrag zur Erhöhung des Insassenschutzes durch Körperschallmessung in der Crasherkenntung. Dissertation. Magdeburg.

Spannaus, Paul (2009): Körperschallentstehung im Fahrzeugcrash: Ein Beitrag zur Verbesserung der Crasherkenntung. Dissertation. Halle-Wittenberg.

Beitrag

Scherrmann, Patrick; Kohlhuber, Markus; Brandmeier, Thomas (2011): Auswertung aktiv erzeugter Körperschallsignale im Fahrzeug. In: Gerald Gerlach (Hg.): Miniaturisierte analytische Verfahren. Dresden: TUDpress, S. 219–223.