

Gemeinsamer Abschlussbericht der Forschungsstellen
Fraunhofer-IWU, Fraunhofer-IST und HSG-IMIT
für den Zeitraum 01.03.2006 – 29.02.2009

Inhaltsverzeichnis

1	Forschungsthema	2
2	Wissenschaftlich- technische und wirtschaftliche Problemstellung	2
2.1	Ausgangssituation	2
2.2	Stand der Forschung	3
2.3	Bedarf bei den Unternehmen	4
3	Forschungsziel / Ergebnisse / Lösungsweg.....	5
3.1	Forschungsziel.....	5
3.1.1	Lösungsansatz.....	5
3.1.2	Angestrebte Forschungsergebnisse	5
3.1.3	Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse	6
3.2	Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels	6
3.3	Ergebnisse.....	7
3.3.1	Erstellung eines Anforderungskataloges an die Dünnschichtsensorik.....	7
3.3.2	Konzipierung des Sensoraufbaus und der Signalauskoppelung	8
3.3.3	Aufbau eines Prüfstandes zur Sensorcharakterisierung und –kalibrierung	13
3.3.4	Herstellung und Charakterisierung von Kraftsensoren.....	15
3.3.5	Anpassung eines Schneidwerkzeuges zur Aufnahme der Kraftsensoren.....	17
3.3.6	Anpassung und Optimierung der Kraftsensoren im Modellversuch.....	19
3.3.7	Schneidversuche	24
3.3.8	Sensorelektronik.....	26
3.3.9	Abgleich der Online-Kraftmessung mit der Prozesssimulation.....	43
3.3.10	Optimierung der Dünnschichtsensorik	44
3.3.11	Langzeitversuche.....	49
3.3.12	Auswertungen	51
4	Wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas für kleine und mittlere Unternehmen (kmU)	57
4.1	Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse	57
4.2	Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der kmU	57
5	Beabsichtigte Umsetzung der angestrebten Forschungsergebnisse	57
6	Durchführende Forschungsstellen.....	58

1 Forschungsthema

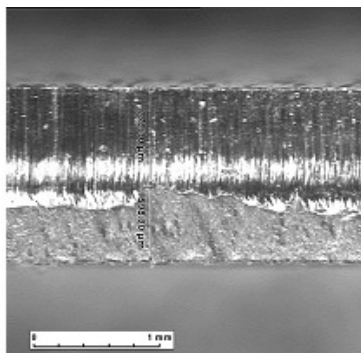
Einsatz neuartiger Dünnschicht-Kraftsensoren zur Überwachung von Schneidprozessen

2 Wissenschaftlich- technische und wirtschaftliche Problemstellung

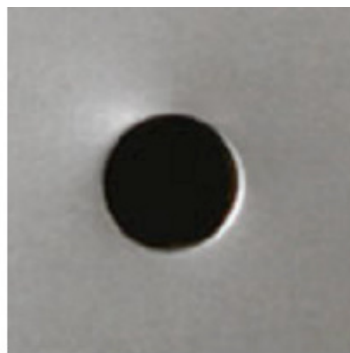
2.1 Ausgangssituation

Das Scherschneiden ist eines der am weitesten verbreiteten Schneidverfahren und wird in zahlreichen kleineren und mittleren Unternehmen des Maschinenbaus sowie der Zulieferindustrie zur Herstellung fertigfallender Teile angewandt.

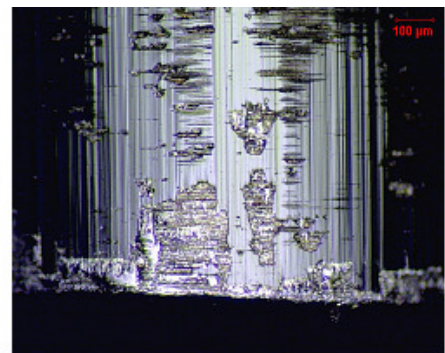
In den meist automatisierten und bei hohen Hubzahlen ablaufenden Schneidprozessen unterliegen die Aktivteile sehr hohen Beanspruchungen. Neben dem Versagensfall Werkzeugbruch beeinträchtigen Ausbrüche an den Schneidkanten und Kaltaufschweißungen mit ihren Auswirkungen auf die Qualität der Bauteile (Abb. 1) maßgeblich die Wirtschaftlichkeit der Schneidprozesse.



Schnittqualität



Deformationen am Blechteil



Zunehmender Werkzeugverschleiß im Prozessverlauf

Abb. 1: Problemfelder beim Scherschneiden

Eine Hauptursache ist die Veränderung des Schneidspaltes und der Schneidengeometrie im Prozessverlauf. Ursachen dafür sind vor allem: fortschreitende Adhäsion und Kaltaufschweißungen an Schneidstempel und Matrize sowie zunehmender Werkzeugverschleiß. Durch geeignete Maßnahmen, wie z.B. durch die Verwendung von Werkzeugbeschichtungen, angepassten Schmierstoffen und optimierten Werkzeuggeometrien, lassen sich Veränderungen am Schneidspalt reduzieren, aber nicht vollständig vermeiden. Übersteigen die Veränderungen ein bestimmtes Maß, führt dies zur Zerstörung der Werkzeugbeschichtung, zu einem erhöhten Verschleiß der Aktivteile an den Kontaktflächen zum Blechwerkstoff, zum Qualitätsverlust am Schnittteil und im ungünstigsten Fall zum Werkzeugbruch. Für eine sichere Prozessführung ist daher eine Überwachung des Schneidprozesses erforderlich. In der Regel geschieht dies einerseits durch eine Gesamtpresskraftmessung, die das Werkzeug und die Maschine vor einer Überlastung schützt und andererseits durch die stichprobenartige Prüfung der Werkstückqualität, z.B. auf Konturfeder oder Gratbildung an den Schnittkanten. Der Forderung nach einer Online-Überwachung des Schneidprozesses, die es erlaubt, frühzeitig in den Schneidprozess einzugreifen, entsprechen diese Methoden jedoch nicht.

Eine messbare Größe die zur Online-Prozessüberwachung herangezogen werden kann, ist die Schneidkraft. Schneidspaltverengungen und ein fortschreitender Werkzeugverschleiß wirken sich unmittelbar auf den Schneidkraftverlauf aus. Abb. 2 zeigt den Anstieg der Schneidkraftmaxima infolge veränderter Bedingungen im Schneidspalt.

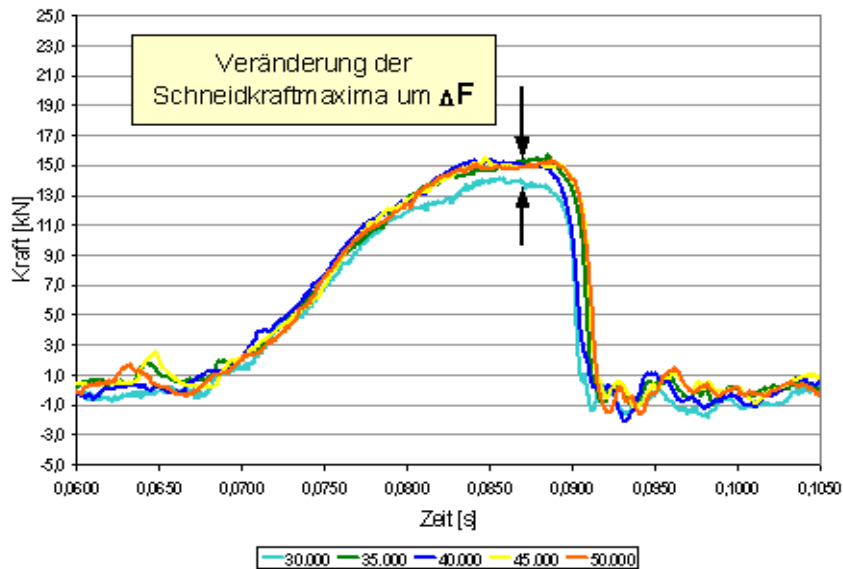


Abb. 2: Veränderungen im Schneidkraftverlauf nach 30 000 Schnitten in TRIP 700 durch Schneidspaltverengung; Stempel aus 1.2363 TiC-TiN-beschichtet.

2.2 Stand der Forschung

Prozessüberwachung beim Schneiden

Neben der Vorschub-, Doppelblech-, Positionier- und Auswurfkontrolle zählt die Überwachung der Gesamtpresskraft im Maschinenkörper zur Standardausrüstung an Schneid- anlagen. Die klassische Presskraftmessung mit Sensoren am Maschinenständer wird als wenig eindeutig angesehen.

Direkt im Werkzeug gelangen Piezoelemente und Dehnmessstreifen zur Anwendung, die jedoch auf Grund ihrer Nachteile (Tabelle 1) nur eine verhaltene Akzeptanz bei den Anwendern finden.

<u>Messung in der Presse</u>	<u>Messung im Werkzeug</u>
<ul style="list-style-type: none"> Messung der minimalen und maximalen Kräfte mit Sensoren am Ständer der Maschine <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> Versagen von kritischen Einzelwerkzeugen ist nicht zu erfassen, da die auftretenden, geringen Kraftveränderungen kaum Einfluss auf die Gesamtbelastung der Maschine haben 	<ul style="list-style-type: none"> Piezoelemente (z.B. Quarzkristalle, Keramik) <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> Steifheitsverluste im Kraftfluss Vergleichsweise hohe Kosten Sprödigkeit, Bruchgefährdung Temperaturempfindlichkeit Fehlende Ortsauflösung <ul style="list-style-type: none"> Dehnmessstreifen <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> Kräfte nur indirekt über Dehnungen/ Stauchungen messbar relativ großer Platzbedarf Temperaturempfindlichkeit Kriechverhalten bei geklebten Sensoren

Tabelle 1: Möglichkeiten zur Kraftmessung im Schneidprozess (Auswahl)

Stand der Technik zu Kraftsensoren auf Basis von DLC- Schichten

Das Fraunhofer-IST beschäftigt sich seit einigen Jahren mit der Entwicklung von neuartigen multifunktionalen und auf DLC basierenden Schichtsystemen, die neben den hervorragenden mechanischen auch kraft- und temperatursensorische Eigenschaften besitzen. Ein Beispiel einer Kraftmessung mit einem zylindrischen Stempel ist in Abb. 3 gezeigt. Gemessene Kraft-Widerstandskennlinien sind in Abb. 4 dargestellt. Die kraftsensorische Schicht kann grundsätzlich bis in den Höchstlastbereich eingesetzt werden. Bei dieser Messreihe wurden Drücke bis 500 MPa realisiert. Das dynamische Verhalten der kraftsensorischen Beschichtung wird in Abb. 5 demonstriert. Diese Messung wurde bei einer Frequenz von 100 Hz durchgeführt. Mittlerweile wurden die Messungen erfolgreich bis auf 8 kHz ausgedehnt. Es ist zu erwarten, dass die kraftsensorische Schicht für einen noch wesentlich höheren Frequenzbereich geeignet ist.

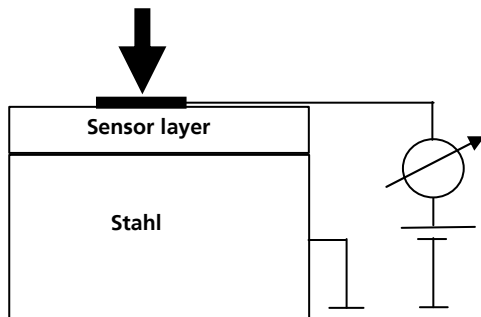


Abb. 4: Anordnung für die Kraftmessung

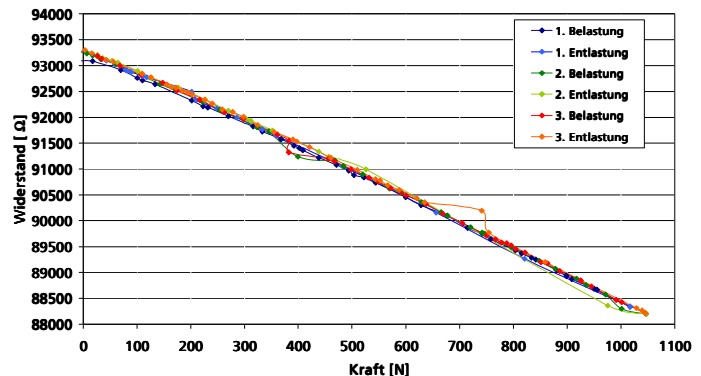


Abb. 3: Widerstandsmessung in Abhängigkeit von Be- und Entlastung

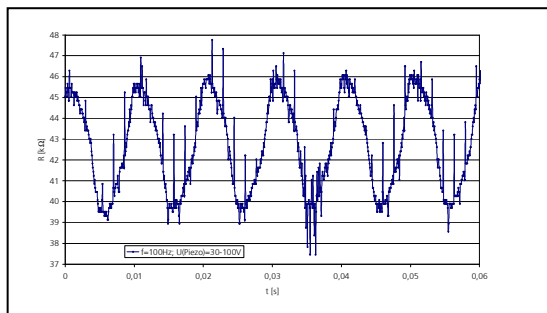


Abb. 5: dynamische Kraftmessung mit einer diamantartigen F-DLC-Schicht bei 100 Hz

2.3 Bedarf bei den Unternehmen

Ca. 85% der Werkzeugausfälle werden durch die Aktivteile verursacht. Die Werkzeugüberwachung hat deshalb eine zentrale Bedeutung und ist bereits bei der Konstruktion der Werkzeuge zu berücksichtigen. Auf Grund der breiten Anwendung von Normteilen in Werkzeugkonstruktion und -bau, durch deren Einsatz je nach Ausführung des Werkzeuges eine 25 - 45% kürzere Fertigungszeit möglich wird, ist eine Abstimmung der Überwachungstechnik auf diese Normteile vorteilhaft.

Mit Bezug auf die Ausgangssituation für das Projektvorhaben bleibt festzustellen, dass die vorhandenen Lösungen zur Überwachung von Schneidprozessen auf Grund der schwierigen Platzverhältnisse in Schneidwerkzeugen und im Pressenraum, der Störanfälligkeit von Messsystemen unter Produktionsbedingungen sowie den teilweise hohen Kosten nur verhalten von den Unternehmen genutzt werden, obwohl ein starker Bedarf nach Lösungen zur Prozessüberwachung beim Schneiden durch die Forderungen nach gefertigten Bauteilen besteht.

3 Forschungsziel / Ergebnisse / Lösungsweg

3.1 Forschungsziel

Die Zielstellung für das Vorhaben der industriellen Gemeinschaftsforschung ist die Entwicklung, Erprobung und Optimierung von Dünnschichtsensoren zur Überwachung des Schneidkraftverlaufes bei Scherschneidprozessen. Folgende Anforderungen sollen die Dünnschichtsensoren erfüllen:

1. Platzsparender und anwenderfreundlicher Messaufbau im Werkzeug
2. Kostengünstige Kraftaufnehmer als Massenbauteile (Normteile)
3. Robuster Aufbau der Sensorsysteme

3.1.1 Lösungsansatz

Der Schwerpunkt der Arbeiten soll auf die Entwicklung von Dünnschichtsensoren zur Erfassung der Kräfte am Stempelkopf (Abb. 6) gelegt werden. Zusätzlich soll untersucht werden, inwieweit die kraftsensorischen Schichten geeignet sind, auch Radialkräfte an der Schneidbuchse zu erfassen.

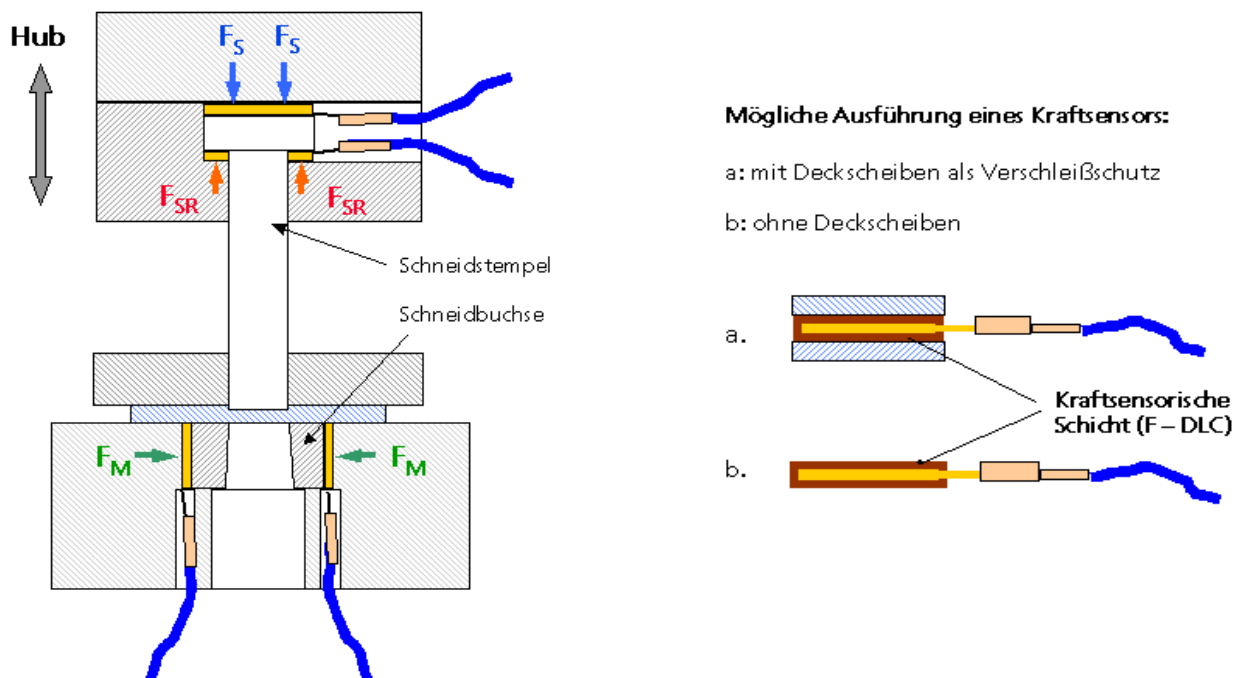


Abb. 6: Ausführungsvarianten der Kraftsensoren

3.1.2 Angestrebte Forschungsergebnisse

Die angestrebten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse ergeben sich aus den Forschungszielen. Den Anwendern von Scherschneidprozessen soll ein platzsparender, robuster und anwenderfreundlicher Messaufbau zur Verfügung gestellt werden, der es erlaubt die Schneidkräfte am Werkzeug so zu erfassen, dass eine Online-Prozessüberwachung möglich ist. Die zu entwickelnden Sensoren, auf Basis kraftsensorischer Schichten, sollen als Massenbauteile (Normteile) eine kostengünstige Alternative zu den bisher verwendeten Messsystemen bieten und für eine breite Anwendung unter Produktionsbedingungen geeignet sein.

Wenn die angestrebten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse erzielt werden können, sind positive wirtschaftliche Effekte in verschiedenen Bereichen zu erwarten:

- Erschließung neuer Märkte für die Unternehmen der Beschichtungs- und Sensortechnik
- Verbesserung der Marktchancen von Werkzeugherstellern im internationalen Wettbewerb durch Implementierung der Kraftsensorik in Werkzeugnormen
- Höhere Wirtschaftlichkeit von Scherschneidprozessen durch Online-Prozessüberwachung (verringerte Ausschuss, bessere Produktqualität, Vermeidung von Werkzeugbruch)

Das vorgestellte Konzept für eine einfach aufgebaute, universell einsetzbare Kraftsensorik lässt sich auch auf andere Anwendungen zur Überwachung von Kräften im Maschinen- und Automobilbau übertragen. Dadurch ist eine sehr breite Verwertbarkeit der Forschungsergebnisse gegeben.

3.1.3 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Als innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse ist anzusehen:

- Die Weiterentwicklung der kraftsensorischen Schichten für die speziellen Anforderungen der Scherschneidtechnik (Mindestanforderungen unter 3.1.2).
- Die Entwicklung eines neuartigen Verfahrens zur Online-Überwachung von Scherschneidvorgängen.
- Die Anwendung der kraftsensorischen Schichten auf kostengünstigen Massenteilen.
- Die Anwendung einer Online-Überwachung von Scherschneidvorgängen unter Produktionsbedingungen.

3.2 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Der Lösungsweg, der zur Erreichung des Forschungsziels vorgesehen ist, umfasst die folgenden Arbeitspakete (AP):

- AP1 Erstellung eines Anforderungskataloges an die Dünnschichtsensorik
- AP2 Konzipierung des Sensoraufbaus und der Signalauskoppelung
- AP3 Aufbau eines Prüfstandes zur Sensorcharakterisierung und -kalibrierung
- AP4 Herstellung und Charakterisierung von Kraftsensoren
- AP5 Anpassung und Optimierung des Sensoraufbaus im Modellversuch
- AP6 Anpassung eines Schneidwerkzeuges zur Aufnahme der Kraftsensoren
- AP7 Schneidversuche
 - Mit konventionellen Kraftmessverfahren
 - Mit dünnsschichtsensorischen Kraftmessverfahren

Meilenstein: Als Voraussetzung für die Weiterführung und einen erfolgreichen Abschluss des Projektes müssen am Ende von AP 7 mindestens die Anforderungen aus AP 1 erfüllt werden.

- AP8 Optimierung der Dünnschichtsensorik
- AP9 Abgleich der Online-Kraftmessung mit der Prozesssimulation
- AP10 Langzeitversuche
- AP11 Auswertung
- AP12 Abschlussbericht

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Erstellung eines Anforderungskataloges an die Dünnschichtsensorik

Entsprechend dem Bedarf der Unternehmen waren im Projektantrag folgende Anforderungen an die neue Sensorik für den Schneidprozess formuliert worden:

Lastbereich:	bis 150 kN
Anwendbar für Hubfrequenzen:	zwischen 60 und 120 Hub/min
Stempeldurchmesser:	zwischen 6 und 12 mm
Langzeitstabilität:	ca. 100 000 Hub bis zum ersten Nachschliff
Zugfestigkeit der Blechwerkstoffe:	bis 800 N/mm ²
Blechdicke:	zwischen 0,7 und 3 mm
Blechsorten:	Aluminiumblech; Edelstahl

Die Auswertung der mittels Kraftsensoren zu erfassenden Schneidkraftverläufe wurde dabei als zweistufiger Prozess betrachtet:

1. Erfassung der qualitativen Abweichungen über einen bestimmten Zeitraum für die industrielle Anwendung in der Stanzerei
2. Erfassung der quantitativen Kraftmaxima als Eingangsgrößen für die FEM-Simulation

In Beratungen mit dem Projektbegleitenden Ausschuss wurden diese Anforderungen ausführlich diskutiert und folgende zusätzliche Forderungen aufgestellt, die bei der Entwicklung des Dünnschicht-Kraftsensors sowie der dazugehörigen Peripherie zu berücksichtigen waren:

- Auslegung für den in der Industrie üblichen Temperaturbereich (85 °C)
- Ermittlung des Temperaturkoeffizienten im Bereich Raumtemperatur – 85 °C
- Bereitstellung von Schnittstellen: RS 485; USB
- Art des Signals: analog (0 – 10 V) und digital
- Übertragung der Signale via Kabel, da die Kabelführung in Schneidwerkzeugen unproblematisch integriert werden kann
-> möglich wäre auch Integration einer Übertragungsbox im Werkzeug zur kabellosen Datenübertragung
- Erarbeitung einer Montagevorschrift für den Sensor mit Angabe zur Art und Weise der Vorspannung als Information für Konstruktion und Werkzeugbau
- die Flächen der Kontaktierungen sollten für den Temperatursensor und die sensorischen Schichten gleich sein, um annähernd gleiche Verhältnisse zu erhalten
- der Sensoraufbau soll so klein wie möglich gestaltet werden
- das Gehäuse für die Mechanik der Sensorelektronik wird ein IP65-Gehäuse sein
- der Nennlastbereich und die notwendige Vorspannung sind zu spezifizieren

Ausgehend von den Anforderungen der DiaForce®-Schichten an die Elektronik stand die Aufgabe, ein Schaltungskonzept zu entwickeln, das geeignet sein soll, die auf die Sensorschicht einwirkenden Kräfte in elektrische Signale umzusetzen. Die notwendige Elektronik musste somit folgende Funktionsgruppen beinhalten:

Sensorspeisung

Anhand der zu Projektbeginn bekannten Sensorkennlinien musste davon ausgegangen werden, dass der Sensor sehr große Innenwiderstände aufweisen kann. Dies stellt hohe Anforderungen an die Sensorspeisung. Grundsätzlich waren zwei Arten der Versorgung möglich: die Konstantspannungs- bzw. die Konstantstrom-Versorgung. Simulationen ergaben, dass es günstiger ist, eine Konstantstromspeisung anzuwenden und den Spannungsabfall am Sensor zu messen, als eine Spannungsspeisung, bei der ein extrem kleiner Strom in eine Spannung umgewandelt werden muss.

Signalverstärkung

Ähnlich hohe Anforderungen stellte die DiaForce®-Schicht an die Verstärkerschaltung. Der Eingangsstrom in die Verstärker sollte die Messsignale nicht beeinflussen.

Arbeitspunktstabilisierung

Die DiaForce®-Schichten sind Prinzip bedingt sehr Temperatur empfindlich. Die Widerstandskennlinie verschiebt sich über die Arbeitstemperatur extrem. Die Temperaturerfassung sowie -kompensation war somit zwingend notwendig und die Spezifizierung der genauen Anforderungen an die Kompensationsstruktur inhaltlich während des Forschungsvorhabens zu erarbeiten.

Signalberechnung

Die verstärkten Signale müssen skaliert, linearisiert, eventuell umgerechnet bzw. bewertet und in geeigneter Form dem Anwender zur Verfügung gestellt werden. Dies kann in unterschiedlicher Form realisiert werden. Die genaue Ausprägung war Bestandteil der Projektarbeit.

Stromversorgung

Bedingt durch den Grundaufbau und den Einbauort ergaben sich besondere Anforderungen an die Stromversorgung. Mindestens ein Sensoranschluss musste sich auf der Potenzial-erde der Maschine befinden.

Die elektronische Signalaufbereitung sollte möglichst für alle Sensorvarianten einsetzbar sein. Die angegebene Flexibilität basierte auf den bis dahin bekannten technischen Daten der Sensoren:

Spannungsversorgung:	DC24V, Maschinenbau üblich
Stromaufnahme:	nicht definiert
Sensorversorgung :	Konstantstrom 1µA – 1mA
Temperatursensorspeisung:	Konstantstrom 1µA – 1mA
Temperaturkompensation:	Bestandteil der laufenden Projektarbeit
Offsetabgleich:	Bestandteil der laufenden Projektarbeit
Sensoranschluss:	mindestens ein Kraftsensor und ein Temperatursensor
Verstärkung:	einstellbar
Analoge Bandbreite:	10 kHz

3.3.2 Konzipierung des Sensoraufbaus und der Signalauskoppelung

Für die Schneidversuche waren zwei Varianten der DiaForce Sensoren aufgebaut worden. Beide bestanden jeweils aus einer Sensorscheibe aus Federstahl (Durchmesser 30 mm, Blechdicke 0,5 mm) und einer Gegenscheibe (Durchmesser 14 mm, Blechdicke 0,5 mm) sowie einem Sensorboard zur Kontaktierung. Auf den polierten Oberflächen der beiden Scheiben erfolgte der Aufbau der entsprechenden Funktionsschichten. Beide Scheiben wurden stirnseitig aufeinander gelegt, mit dem Sensorboard kontaktiert und in das Werkzeug eingespannt.

Sensoraufbau 1 (geschlossenes System, Abb. 7 und Abb. 8):

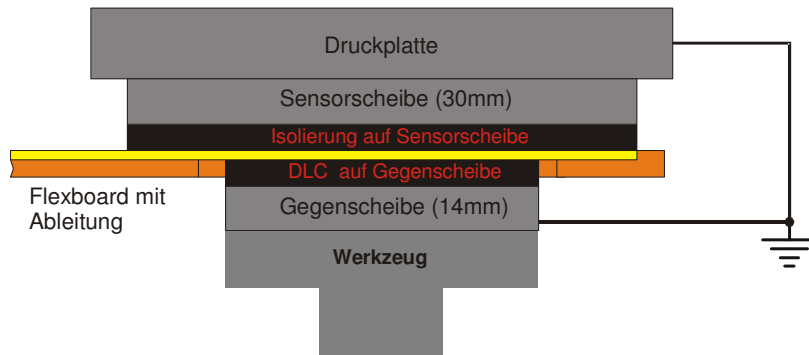


Abb. 7: Schematischer Aufbau des geschlossenen Systems

Schichtaufbau der Sensorscheibe:

- Federstahlsubstrat (30mm), einseitig poliert, $R_z \sim 0,1 \mu\text{m}$
- PACVD: $6 \mu\text{m}$ DLC (a-C:H/Ti)
- PVD: 210 nm Cr (strukturiert)
- PACVD: $3,5 \mu\text{m}$ SICON (a-C:H:Si:O) (Passivierung, Kontaktpads bleiben frei)

Schichtaufbau der Gegenscheibe:

- Federstahlsubstrat (14mm), einseitig poliert, $R_z \sim 0,1 \mu\text{m}$
- PACVD: $3,5 \mu\text{m}$ SICON (a-C:H:Si:O)

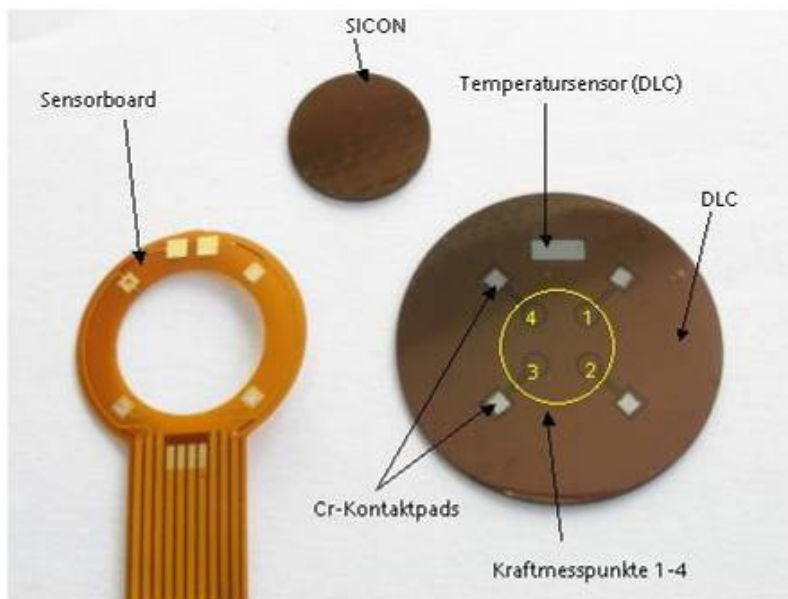


Abb. 8: Realisierung Sensoraufbau geschlossenes System

Sensoraufbau 2 (offenes System, Abb. 9 und Abb. 10):

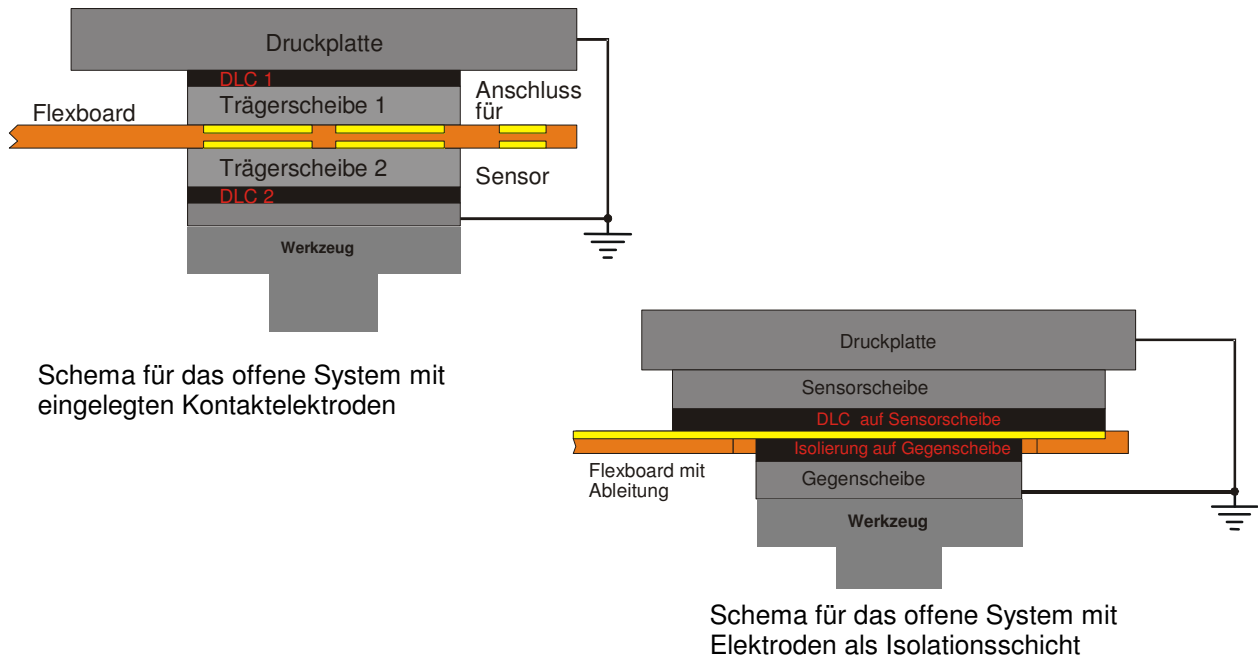


Abb. 9: Schematischer Aufbau des offenen Systems

Schichtaufbau der Sensorscheibe:

- Federstahlsubstrat (30mm), einseitig poliert, $R_z \sim 0,1\mu\text{m}$
- PACVD: $3,5\mu\text{m}$ SICON (a-C:H:Si:O)
- PVD: 210nm Cr (strukturiert)

Schichtaufbau Gegenscheibe:

- Federstahlsubstrat (14mm), einseitig poliert, $R_z \sim 0,1\mu\text{m}$
- PACVD: $6\mu\text{m}$ DLC (a-C:H/Ti)

Die elektrische Kontaktierung der Cr-Kontaktpads und dem Sensorboard erfolgte durch einen leitfähigen Kleber.

Für die Temperaturkompensation standen zwei Varianten zur Verfügung: Im geschlossenen System wurde der entsprechende Kraftmesspunkt mit dem Temperaturmesspunkt in Serie verschaltet, so dass sich bei Erwärmung beide Widerstände proportional gleich ändern und die gemessenen Spannungsabfälle unverändert bleiben. Im offenen System wurde der Widerstand des Cr-Mäanders gemessen und der Kraftwert im Nachhinein bereinigt.

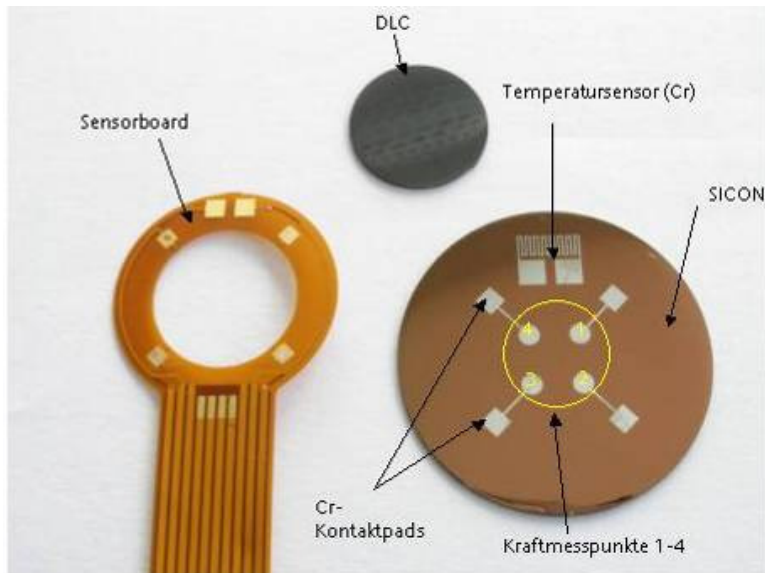


Abb. 10: Realisierung Sensoraufbau offenes System

Entwicklung der Aufbau und Verbindungstechnik

Zur Herstellung der elektrischen Verbindung war es notwendig, ein geeignetes Verfahren zu entwickeln, welches erlaubt, die elektrischen Signale aus der Sensorschicht durch das Werkzeug abzuführen (Abb. 11).

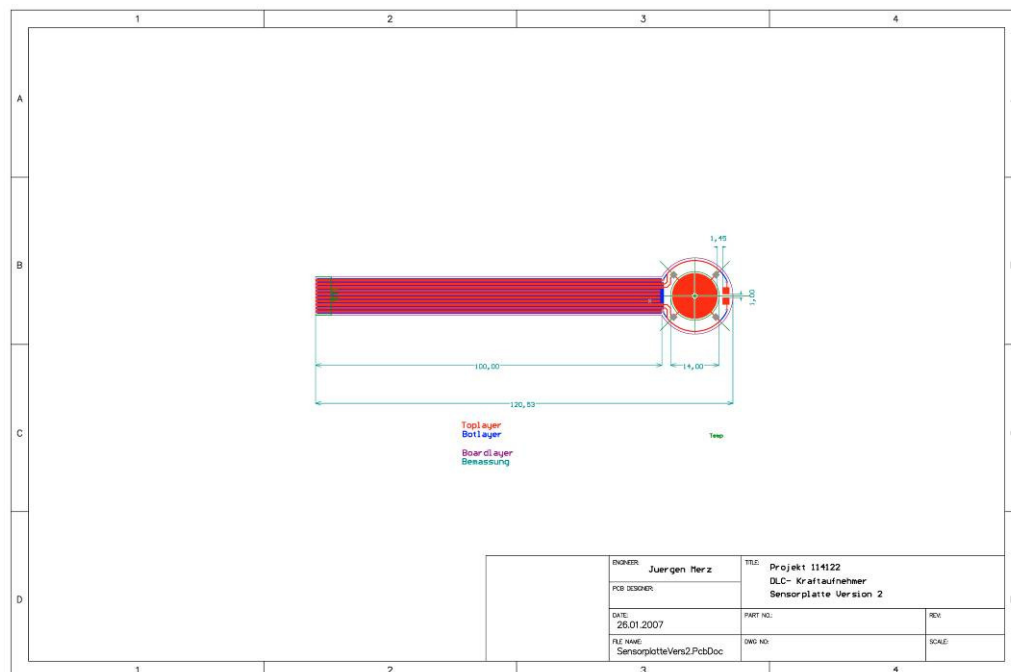


Abb. 11: Konstruktionszeichnung Sensor- Flex-Board, Version 2

Das Kontaktbild der Leiterplatte ist spiegelbildlich identisch mit dem Kontaktbild auf der Sensorstruktur. Flex-Board und Sensor können direkt aufeinander gelegt werden und ermöglichen so die Kontaktierung zur weiterführenden Elektronik mittels 2 mm FDC-Steckverbindung. Über das Flex-Board können bis zu vier Sensorsignale und das Temperatursignal abgeführt werden.

Kontaktierung der Sensorflächen

Die Herstellung des Kontaktes zwischen Sensor und Flex-Board wurde mit unterschiedlichen Verfahren getestet.

- a) Direkte Klemmung zwischen Druckplatte und Schneidplatte
Ein mit eingelegter Kunststoffring sorgt für den notwendigen Anpressdruck zwischen den Kontaktflächen.
- b) Verklebung auf der Kontaktschicht
Die Verbindung erfolgt durch einen mit Silber gefüllten Klebstoff.
- c) Flächig isolierende Verklebung.
Die Verbindung wird nachträglich mit leitfähigem Klebstoff hergestellt. Der Leitkleber wird auf die Bohrung der Durchkontaktierung aufgebracht und ausgehärtet.

Alle Verfahren wurden bei den Mustersensoren angewandt und getestet. Die Auswahl ist abhängig vom gewählten Sensorgehäuse zu treffen.

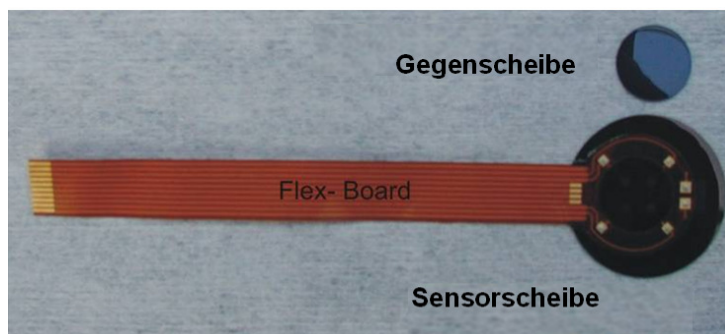


Abb. 12: Sensor, offenes System mit Flex-Board verbinden

Sensorelektronik

Aufbauend auf den Erfahrungen der Testmessungen des Fraunhofer IWU, der daraus abgeleiteten Kennlinien und den Elektroniksimulationen entstand die erste Vorverstärkerschaltung (Abb. 13). Die Elektronik besteht aus den Stromquellen und den Vorverstärkern für zwei Kraftsensoren (Abb. 14). Zur Erfassung weiterer Kraftmesspunkte können mehrere Schaltungen zusammengefasst werden.

Technische Daten:

Spannungsversorgung:	+ -5V bis + -18V, je nach Widerstand der Sensorstruktur
Stromaufnahme:	+ -20mA
Sensorstrom:	10 nA bis 10 mA
Verstärkungsfaktor:	1 fest, bzw. einstellbar

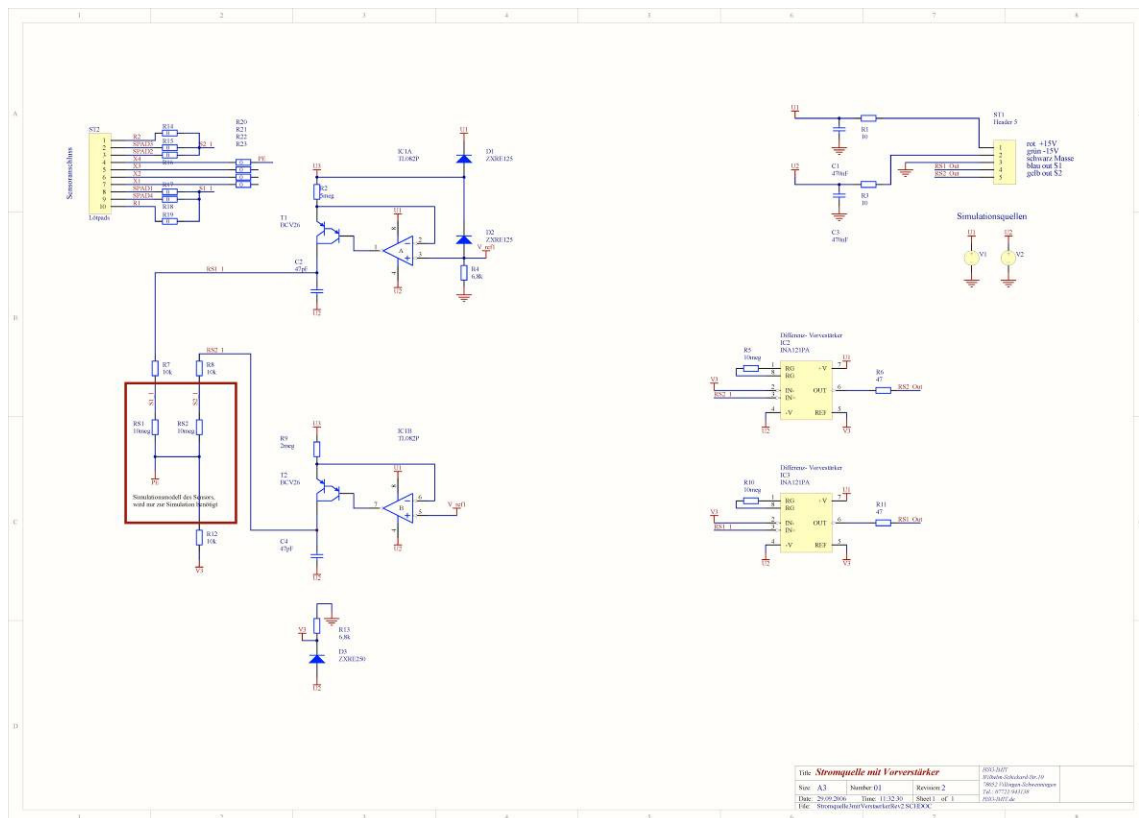


Abb. 13: Stromlaufplan der Verstärkerschaltung

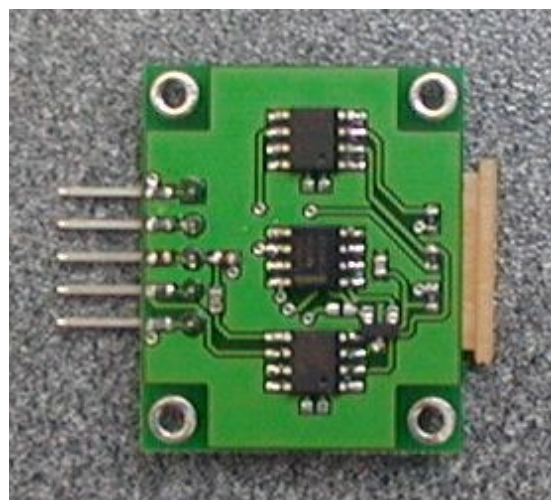
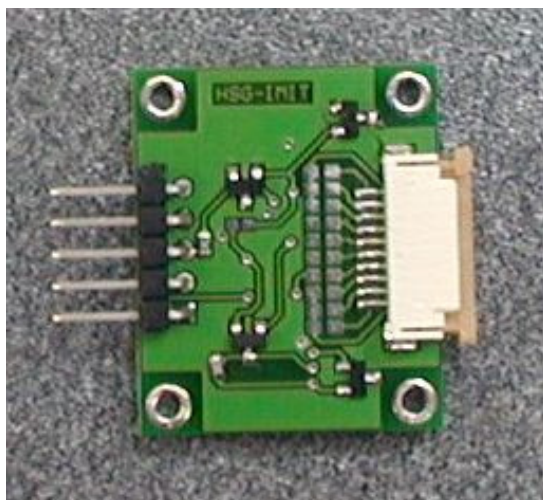


Abb. 14: Sensorverstärker Top- Layer

3.3.3 Aufbau eines Prüfstandes zur Sensorcharakterisierung und –kalibrierung

Für die Vorcharakterisierung der Kraftsensoren wurden zwei Prüfstände modifiziert (Abb. 15). Beide verfügen über eine mechanische Krafteinleitung. Die maximal erzeugbaren Kräfte betragen 1,5 kN bzw. ca. 20 kN. Die Referenzkraftmessung erfolgte über handelsübliche Kraftaufnehmer der Firmen HBM und Kistler.

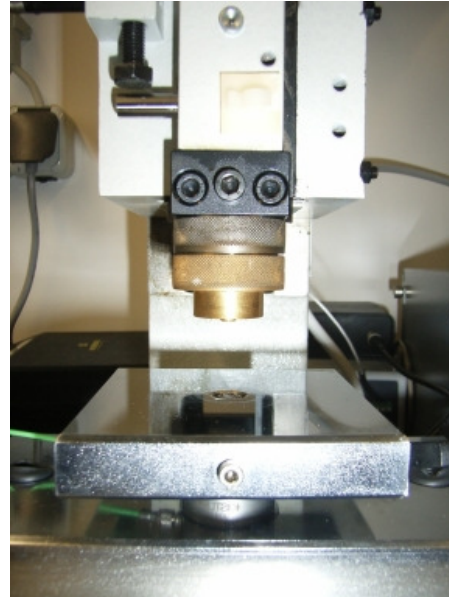
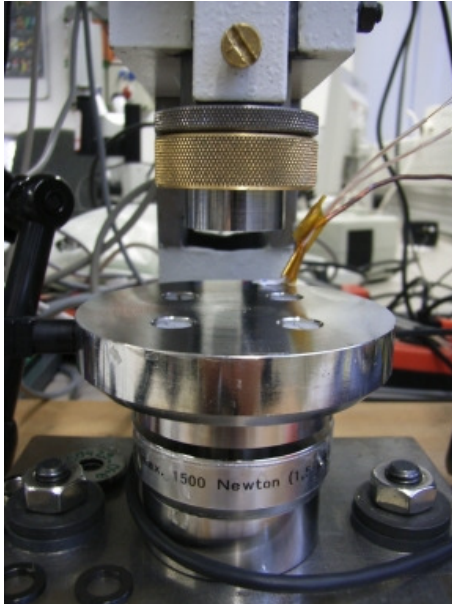
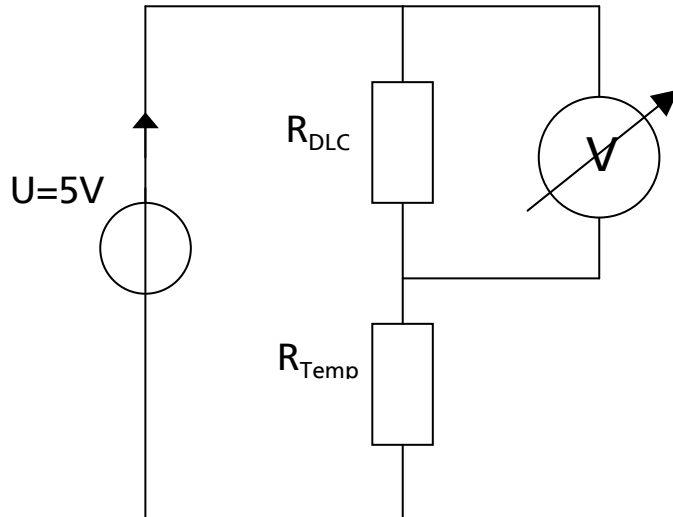


Abb. 15: Kniehebelmessplätze

Die Protokollierung der Temperatur übernimmt jeweils ein Pt100-Messfühler.

Das geschlossene System verfügt mit dem in Abschnitt 3.3.2 erläuterten Sensoraufbau über eine Temperaturkompensation durch eine serielle Verschaltung der Temperaturmessstelle und der Kraftmessstelle. Vorteil hierbei ist, dass sich bei Temperatureinwirkung sowohl Kraft- als auch Temperaturwiderstand im selben Verhältnis ändern und somit der Temperatureinfluss eliminiert wird.



Der Potenzialpunkt zwischen R_{DLC} und R_{Temp} bleibt also gleich. Nachteil ist der durch die Bauart der Presse vorgegebene Massepunkt, der sich ebenfalls zwischen R_{DLC} und R_{Temp} befindet. Der Lösungsansatz besteht darin, den Spannungsabfall über dem DLC-Widerstand mittels Instrumentenverstärker auszukoppeln. Das entsprechende Spannungssignal ist somit masseunabhängig und temperaturkompensiert.

Die obige Methode der Temperaturkompensation lässt sich hingegen für das offene System mit Cr-Mäander nicht realisieren. Dies liegt am unterschiedlichen Temperaturverhalten von DLC und Chrom (Abb. 16). Die Auswertung des Kraft- und Temperatureinflusses muss hier separat erfolgen und später digital zusammengeführt und bereinigt werden.

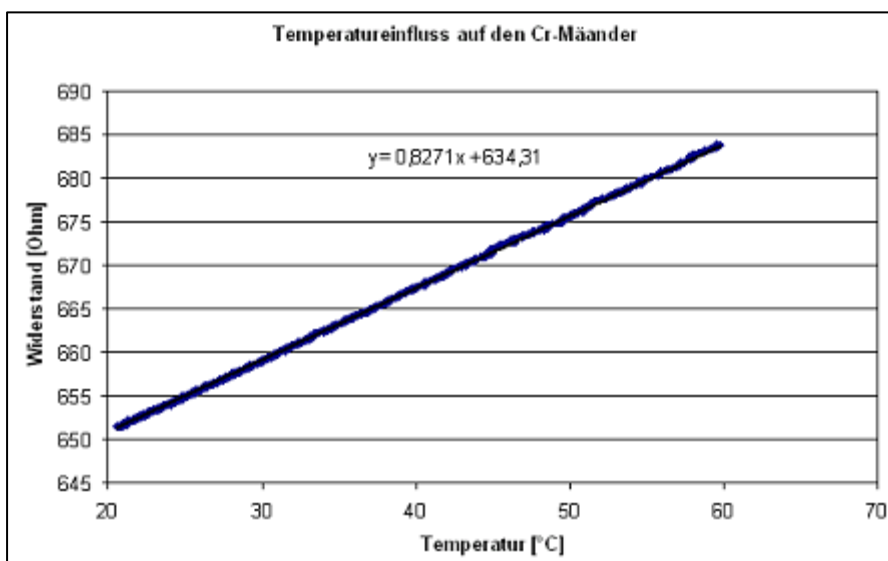
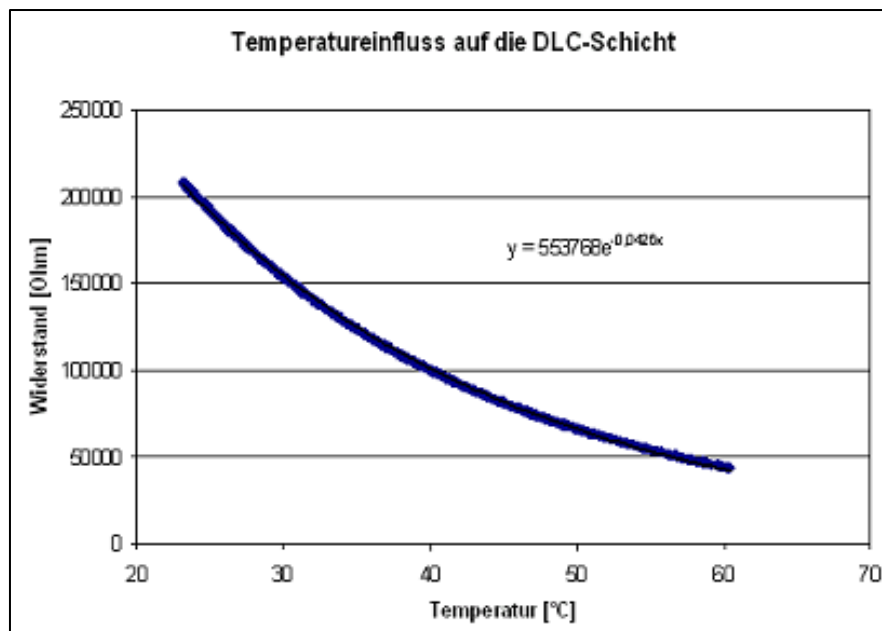


Abb. 16: Temperatur-

einfluss auf die DiaForce®-Schicht und das Chrom-Mäander

Es konnte noch nicht verifiziert werden, ob das Sensorspannungsverhältnis zwischen dem unbelasteten und belasteten Zustand temperaturunabhängig ist. Auswertungen aus zurückliegenden Entwicklungen, die nicht Bestandteil dieses Projektes sind, lassen diese Vermutung zu. Im Erfolgsfall könnte auf die Auswertung des Cr-Mäanders verzichtet werden. Die Schaltungselektronik müsste dann so modifiziert werden, dass das Sensorspannungsverhältnis aus Spannungswert vor dem Stanzvorgang und Spannungswert bei Maximalbelastung gespeichert werden kann.

3.3.4 Herstellung und Charakterisierung von Kraftsensoren

Für die einzelnen, zunächst ohne ein Gehäuse versehenen Sensoraufbauten wurden die große und die kleine Substratscheibe in Stapelanordnung bis 1,5 kN belastet. Das offene System zeigte den typischen 1/x Verlauf während das geschlossene System den typischen linearen Kraft-Widerstandverlauf aufwies (Abb. 17):

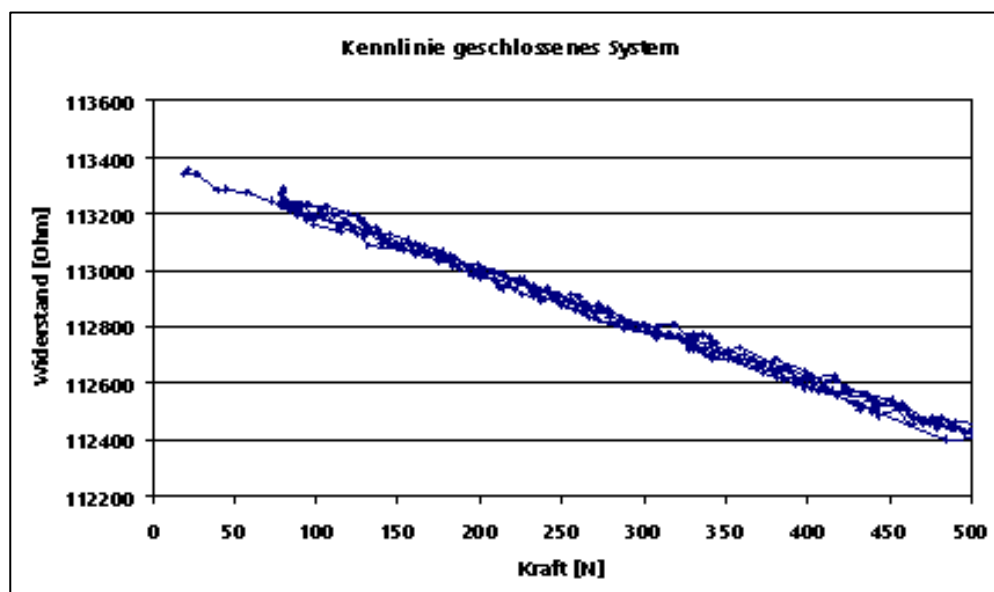
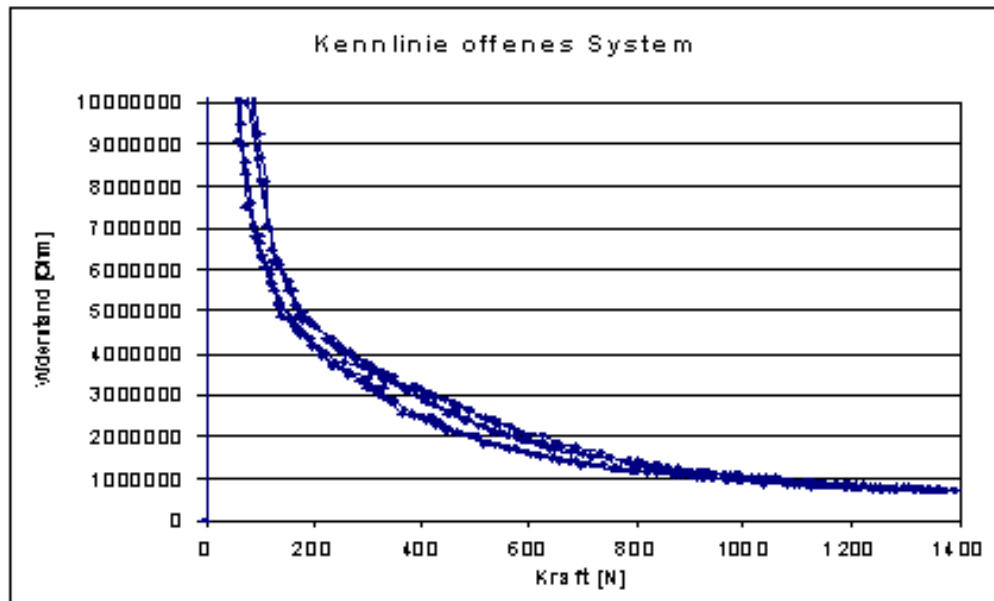


Abb. 17: Sensorkennlinien

Für die Kalibrierung wurden komplett gehaute Sensoren in das Schneidwerkzeug eingesetzt und mit einer Vorspannung von 60 kN am Kniehebelmessplatz bis ca. 20 kN vorcharakterisiert (Abb. 18).

Es ist zu erkennen, dass das offene System mit einer deutlich höheren Widerstandsänderung reagiert als das geschlossene. Somit besitzen beide Systeme ihre Vor- und Nachteile. Welches System zu favorisieren ist, kann zum derzeitigen Zeitpunkt noch nicht festgestellt werden. Es werden für die weiteren Versuche beide Systeme eingesetzt.

Weiterhin ist zu bemerken, dass nicht alle Sensoren defektfrei hergestellt werden konnten. Defekte äußern sich durch Fehlstellen in den SICON-Schichten. Liegen diese Fehlstellen unter den strukturierten Cr-Elektroden, entstehen Kurzschlüsse zum Grundsubstrat und damit zur Maschinenmasse. Der Kraft- bzw. Temperaturpunkt ist somit nicht mehr auswertbar. Die Defektrate bei zehn hergestellten Sensoren lag bei ca. 30 - 40%.

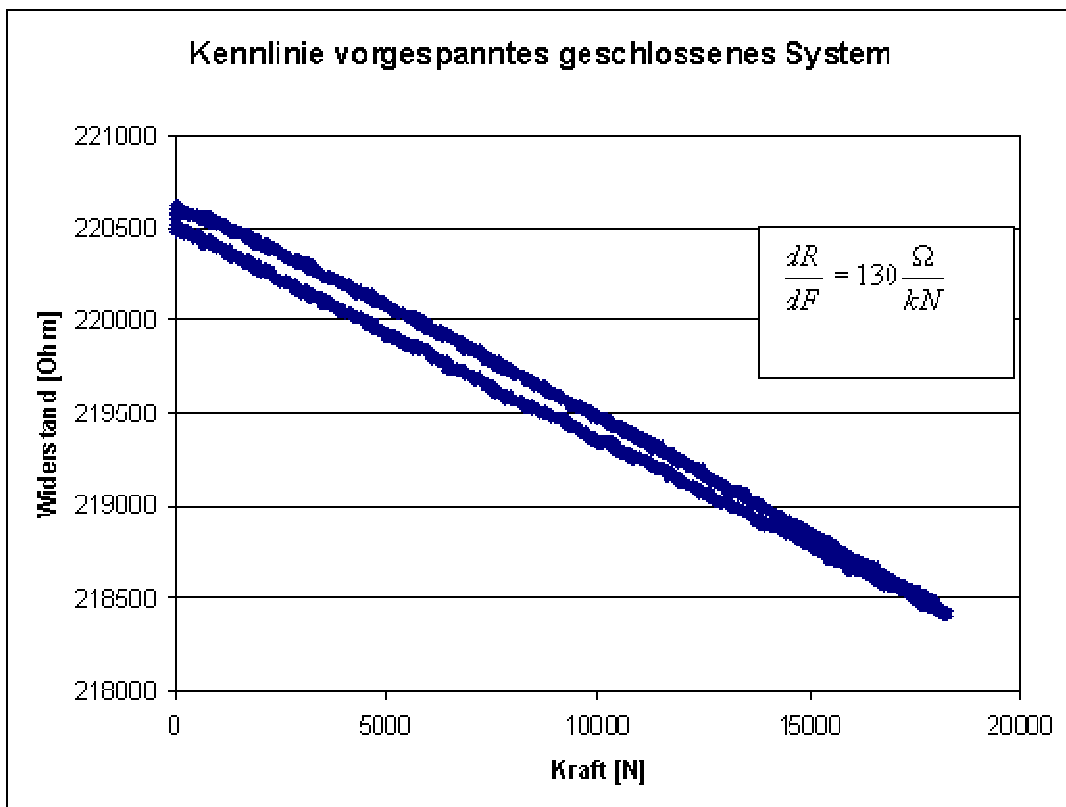
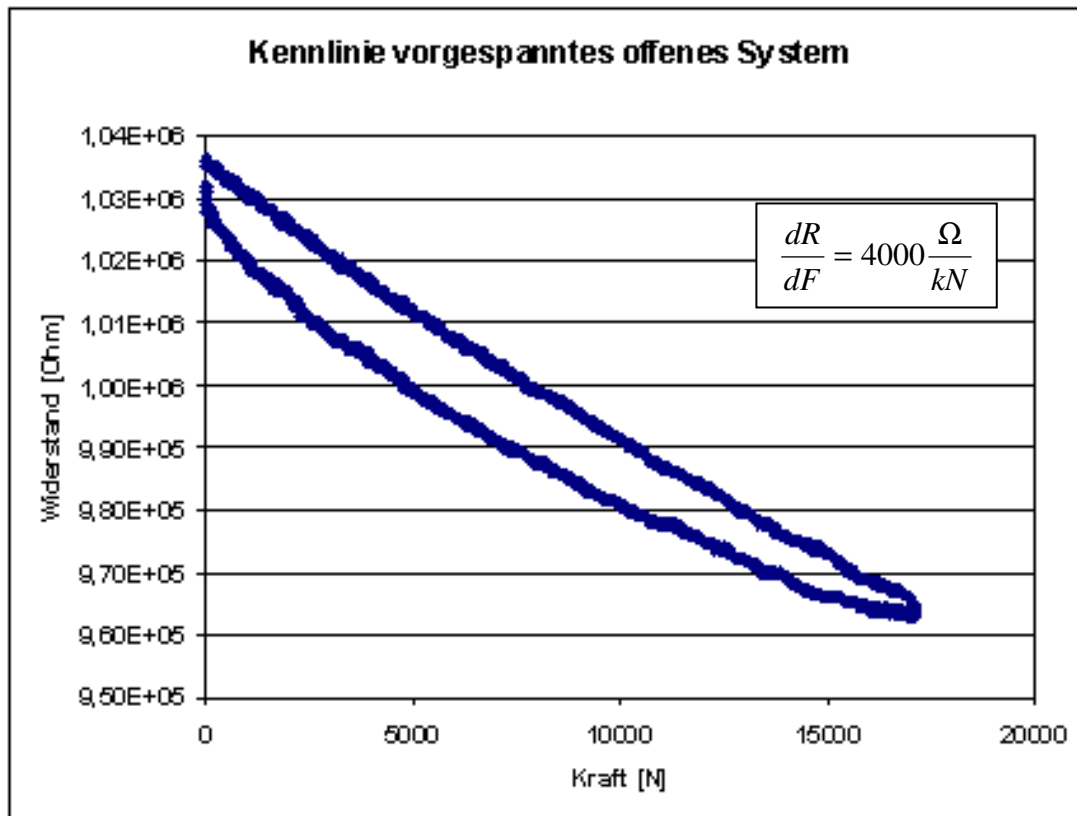


Abb. 18: Kennlinien für Sensoren mit Gehäuse

3.3.5 Anpassung eines Schneidwerkzeuges zur Aufnahme der Kraftsensoren

Für die Untersuchungen zur Anwendbarkeit der kraftsensorischen Schichten kam für erste Versuche das Modellwerkzeug zum Genauschneiden zum Einsatz (Abb. 19). Das für Blechdicken bis 10 mm einsetzbare Lochwerkzeug bot oberhalb des Schneidstempels ausrei-

chend Platz zur Unterbringung der Sensorik. Zur Integration des in der gleichen Abbildung rechts dargestellten Sensorpaketes mit einem Durchmesser von 68 mm wurde die Druckplatte über dem Stempelkopf entsprechend modifiziert.

Während bei den ersten Vorversuchen eine merkliche Schiefstellung des Schneidstempels bei der Montage aufgetreten war, konnte in den Folgeexperimenten der Schneidstempel richtig montiert werden. Dieses wurde erzielt durch Anpassarbeiten an der Werkzeugaufnahme in Bezug auf ein vergrößertes Radialspiel für die von der ursprünglichen Konstruktion abweichende Dicke des Sensors von 6 mm sowie hinsichtlich der Einbringung zusätzlicher Kanäle zur Aufnahme der Messleitungen. Der Schneidstempel mit 30 mm Durchmesser konnte winklig und zentriert in der üblichen Weise mit seiner Halteplatte vorgespannt werden (8 Bolzen der Größe M12).

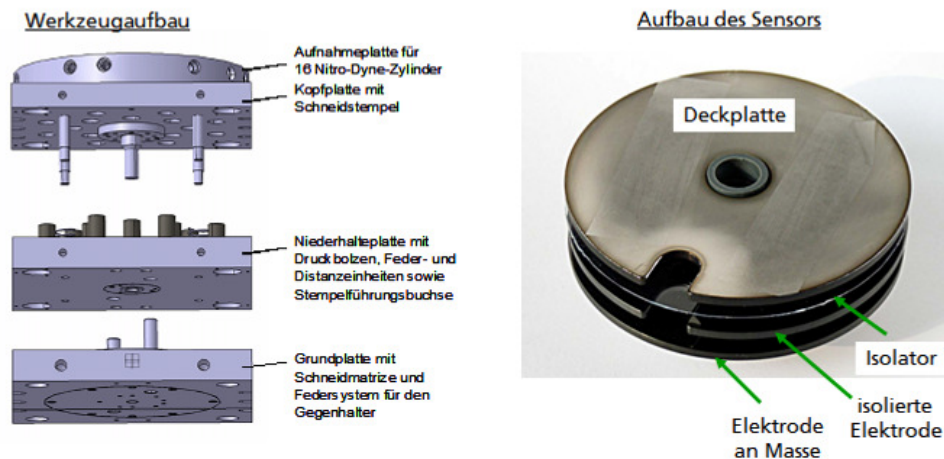


Abb. 19: links - Modell des Versuchswerkzeuges; rechts - Sensoraufbau

Für die weiterführenden Versuche wurde das in Abb. 20 dargestellte Schneidwerkzeug verwendet, das über integriertes Messsystem verfügt und somit für den späteren Vergleich von Dünnschicht-Kraftsensoren und konventioneller Messtechnik vorbereitet ist.



Abb. 20: Schneidwerkzeug, eingebaut in die Exzenterpresse PEEV 25.2

Entsprechend den laut Antrag geplanten Abmessungen für die Schneidstempel wurden für die Versuche Lochstempel aus dem Standard-Programm der Fa. STRACK für Löcher vom Durchmesser 10 mm vorgesehen (Abb. 21). Um neben den Schneidkräften auch die Rückzugskräfte erfassen zu können, erfolgte die Auswahl der zylindrischen Form des Stempelkopfes. Für diese Stempelgeometrie wurden die notwendigen Anpassungsarbeiten am Schneidwerkzeug vorgenommen (Abb. 22).

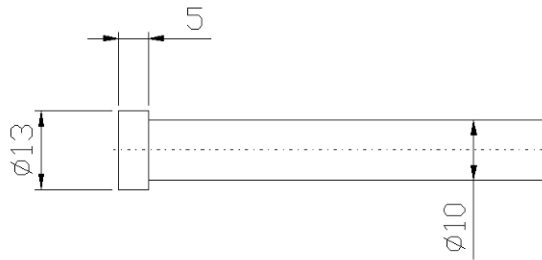


Abb. 21: Abmessung der Schneidstempel

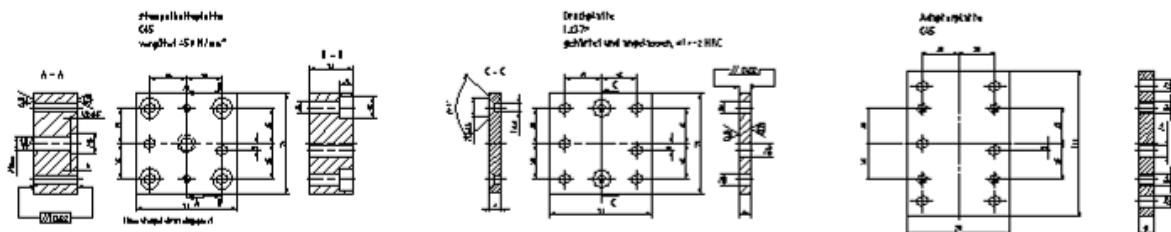


Abb. 22: Umkonstruktion der Platten des Schneidwerkzeuges

Zum Test unterschiedlicher Sensorsysteme erfolgten Neuanfertigungen kompletter Plattenaufbauten (Abb. 23), so dass dadurch mehrere kalibrierte Systeme für die Versuchsdurchführung zur Verfügung standen und die Schneidversuche sehr effektiv durchgeführt werden konnten.



Abb. 23: komplette Plattensysteme mit integrierter Sensortechnik

3.3.6 Anpassung und Optimierung der Kraftsensoren im Modellversuch

Für die ersten Versuche im Genausschneidwerkzeug war ein DiaForce[®]-Sensor einfacher Bauart mit diskreten Elektroden verwendet worden. Dabei fließt der Messstrom durch die Berührfläche zweier Stahlplatten, welche auf den einander zugewandten Seiten mit der DiaForce[®]-Sensorschicht belegt sind. In den Sensoraufbau integriert wurde außerdem ein Pt100-Temperaturfühler zur Bestimmung der Bauteiltemperatur während der Versuche ergänzt worden.

Die Messkette bestand aus dem DiaForce[®]-Sensor mit Pt100-Temperaturfühler, einer rauscharmen Stromquelle Keithley 6221, einem Hochimpedanz-Tastkopf Microdul HIP101

und einem digitalen Transientenrekorder Yokogawa DL750 mit hochauflösendem Spannungseingang sowie dem Pt100-Messumformer.

Vor und nach den Versuchen wurde im montierten Zustand an einer Prüfmaschine mit Kräfteinstellbereich 100 kN die Kennlinie des Sensors im Betriebskraftbereich von 0...100 kN bestimmt (Abb. 24). Die Vorspannung durch die Verschraubung der Halteplatte liegt im Bereich einiger Hundert kN (8 x M12 á 70 Nm Anzugsmoment).



Abb. 24: Werkzeug mit Schneidstempel in der Prüfmaschine

Bei der Bestimmung der Kennlinie vor dem Schneiden konnte die Bauteiltemperatur nicht zuverlässig bestimmt werden. Deshalb wurde diese zuerst aufgenommene Charakterisierung des Sensors nicht näher betrachtet. Im Ergebnis der Versuchsauswertung zeigte sich, dass der Fehler auf mangelhaftem Masseschluss des Werkzeugs auf der Prüfmaschine zurückzuführen war. Er konnte bei der Messung der Kennlinie nach dem Schneidversuch behoben werden. Die anschließend aufgenommene Kennlinie wurde bei der Bestimmung der Näherungsfunktion zur Kraftberechnung aus den Spannungsmessdaten zugrunde gelegt.

Die Aufnahme der Messdaten erfolgte teils mit Abtastraten von 10 kHz und Bandbreitenbegrenzung auf 4 kHz, teils mit 1 MHz bei 100 kHz Bandbreite (Kennzeichnung in den Graphiken zu den einzelnen Versuchen). Der Messstrom betrug jeweils 10 μ A.

Die Schneidversuche (Abb. 25) erfolgten bei Verwendung von Blechwerkstoffen mit unterschiedlichen Blechdicken und verschiedenen mechanischen Kennwerten, um differenzierte Schneidkraftverläufe erfassen zu können. Zum Einsatz kamen Blechstreifen aus Aluminium AlMg3, Tiefziehstahlblech DC04 sowie Edelstahl mit der Werkstoffnummer 1.4301.

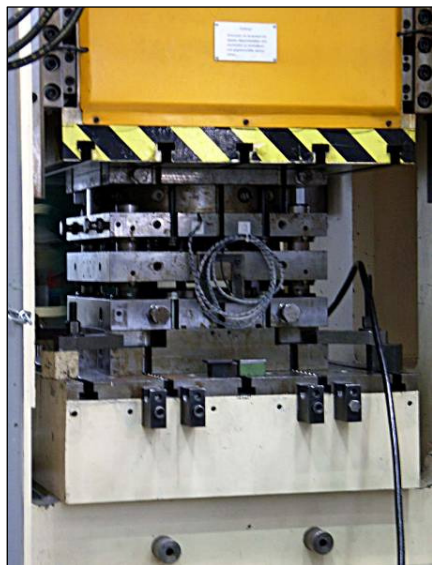


Abb. 25: Werkzeug im eingebauten Zustand an der hydraulischen Presse

In Abb. 26 sind beispielhaft die aufgenommenen Kraftverläufe für das Edelstahlblech enthalten. Modifizierungen in den Presseneinstellungen spiegeln sich auch in den einzelnen Phasen der Kraftverläufe wider: Wird der untere Totpunkt des Stößels soweit verändert, dass kein Schnitt mehr erfolgt, fehlt der für die Trennphase charakteristische steile Abfall der Kraftkurve (gelbe Kurve).

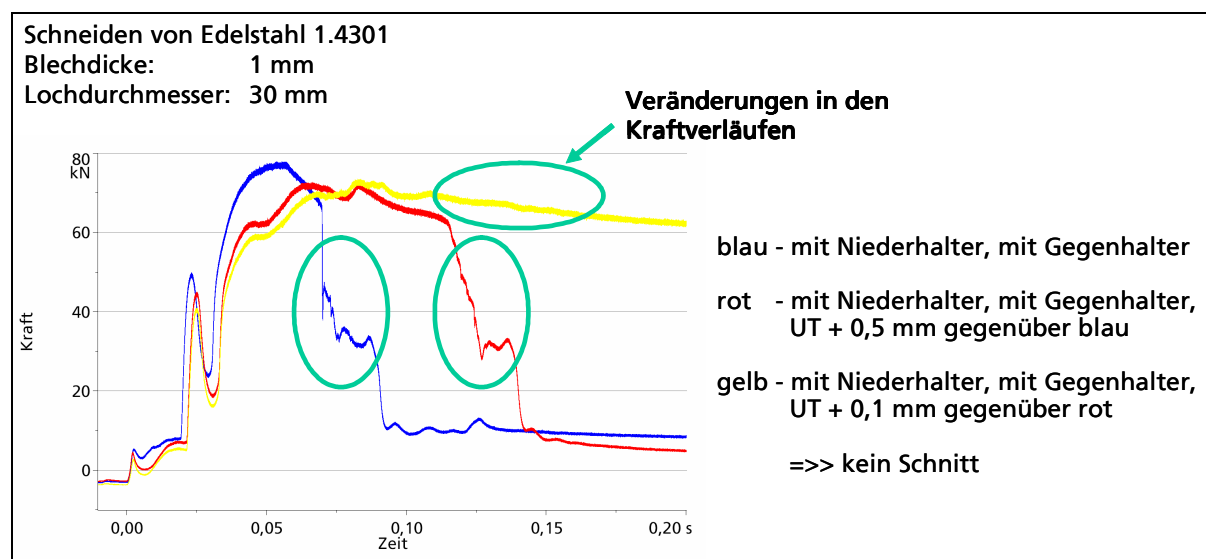


Abb. 26: Kraftverläufe für das Schneiden von Edelstahl 1.4301

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Kraftverläufe bis zum Rückhub des Stempels (Abb. 27) bzw. bis zur Rückkehr des Stößels in die Ausgangsposition (Abb. 28).

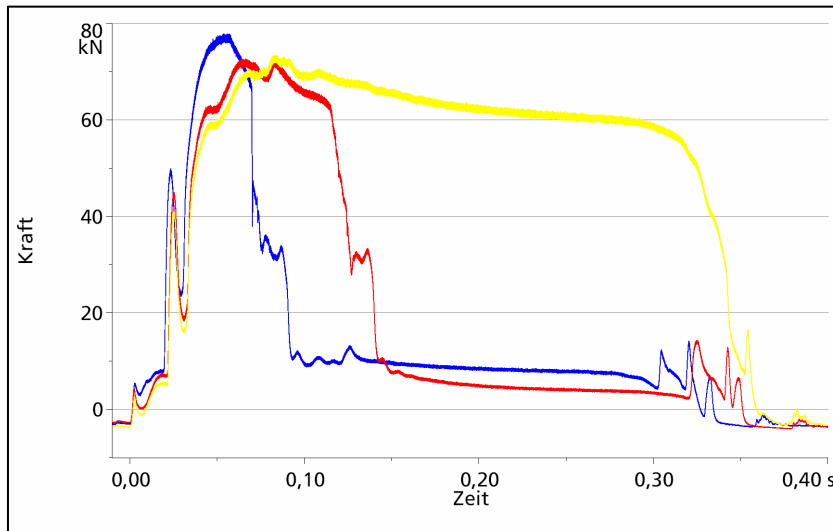


Abb. 27: Kraftverläufe vom Beginn des Schneidprozesses bis zum Rückhub des Stempels

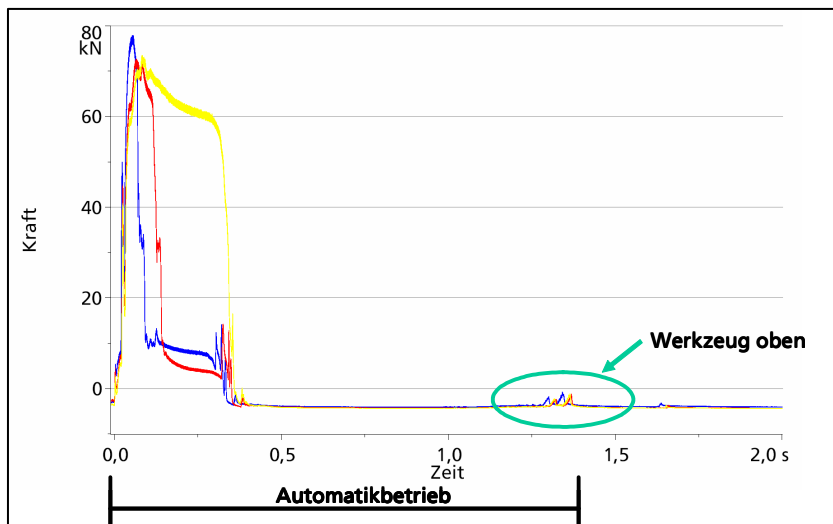


Abb. 28: Kraftverläufe bis zur Rückkehr des Stößels in OT

Die Fortsetzung dieser sehr erfolgreichen ersten Schneidversuche auf der hydraulischen Presse erfolgte auf einer Exzenterpresse mit dem in Abb. 29 dargestellten Werkzeug und unter Nutzung der bereits in Abb. 23 gezeigten Werkzeugelemente.

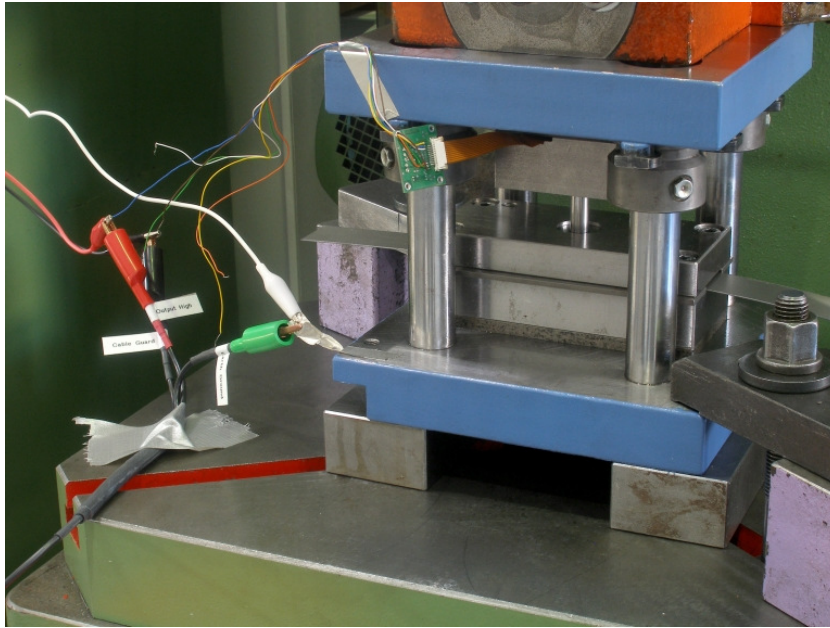


Abb. 29: Lochwerkzeug mit Stempel für Durchmesser 10 mm

Mechanische Halterung, Gehäusetechnik

Erste Messungen wurden mit Sensoren durchgeführt, die nicht von einem Gehäuse gehalten wurden. Für ein einfacheres Handling war es unerlässlich, eine Gehäusetechnik zu entwickeln und zu fertigen. Da sich der grundsätzliche Sensoraufbau auch in den Folgeversuchen auf der Exzenterpresse bewährt hatte, sollte das Gehäuse an den vorhandenen Aufbau angepasst sein, aus Isolationsgründen möglichst in Kunststoff gefertigt werden und sich einfach durch spanende Bearbeitung herstellen lassen. Aus diesen Vorgaben heraus wurde das nachfolgende Gehäuse konstruiert (Abb. 30) und die Aufnahmeplatten für die Integration des eingehausten Sensorpaketes modifiziert (Abb. 31 und Abb. 32).

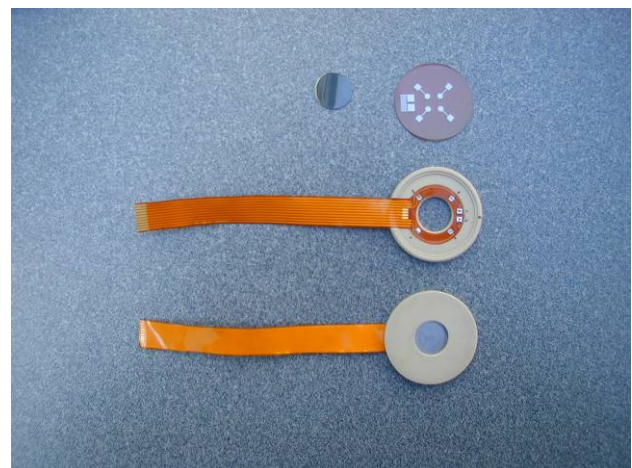
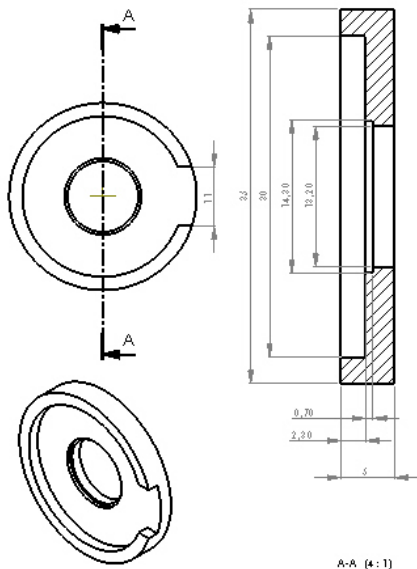


Abb. 30: Konstruktionszeichnung des Sensorgehäuses

Abb. 31: Einzelteile des Aufbaus und komplett montierter Sensor

Einbau der Sensoren

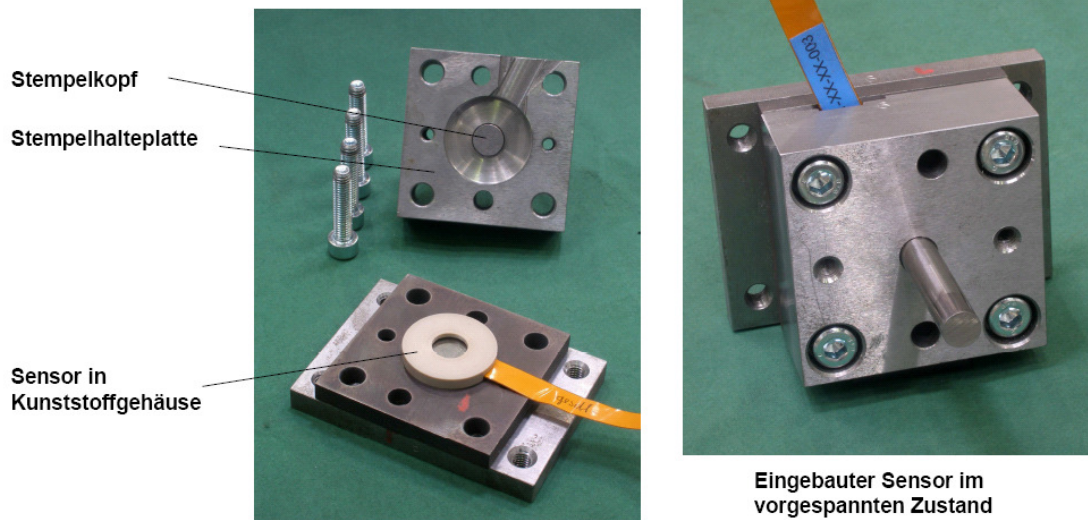


Abb. 32: Plattensystem des Schneidwerkzeuges mit eingebaustem Sensor

3.3.7 Schneidversuche

- Mit konventionellen Kraftmessverfahren
- Mit dünnstschichtsensorischen Kraftmessverfahren

Nach den durchgeführten Optimierungen erfolgten weiterführende Schneidversuche mit dem in Abb. 29 dargestellten Werkzeug bei Einsatz der Sensorsysteme und gleichzeitiger Verwendung einer Messunterlagsscheibe der Fa. Kistler vom Typ 9041A und einem Messbereich von 0 bis 90 kN.

Die Schneidversuche zeigten, dass die Anforderungen aus 3.3.1 umsetzbar waren. Wie in den nachfolgenden Abbildungen (Abb. 33 und Abb. 34) ersichtlich ist, stimmen das Referenzkraftsignal und das Sensorsignal gut überein und weisen die gleichen Charakteristiken auf:

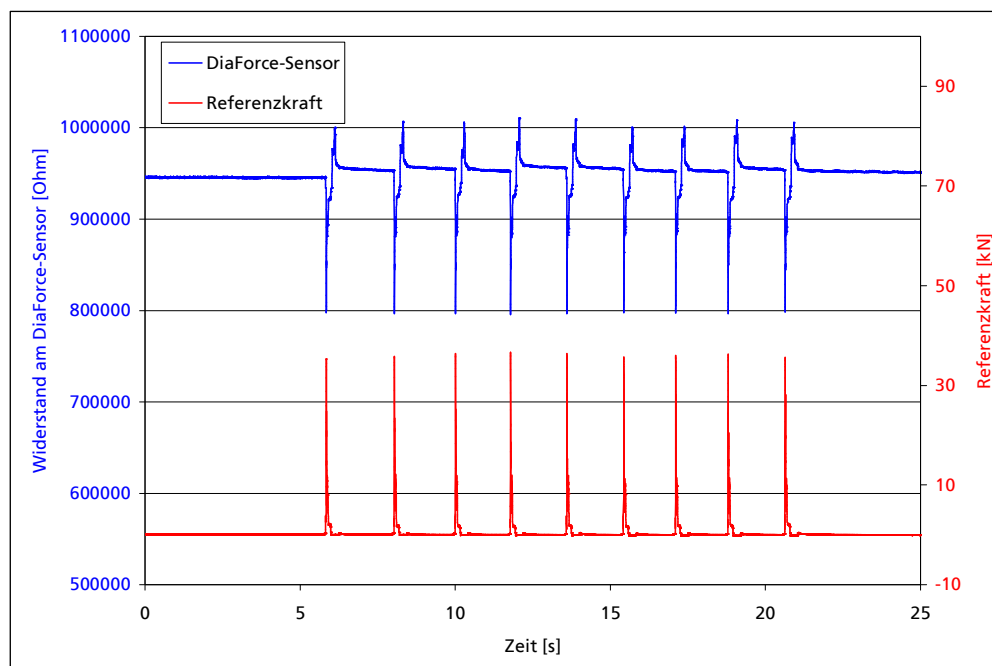


Abb. 33: Kraftmessung mit dem offenen Sensorsystem

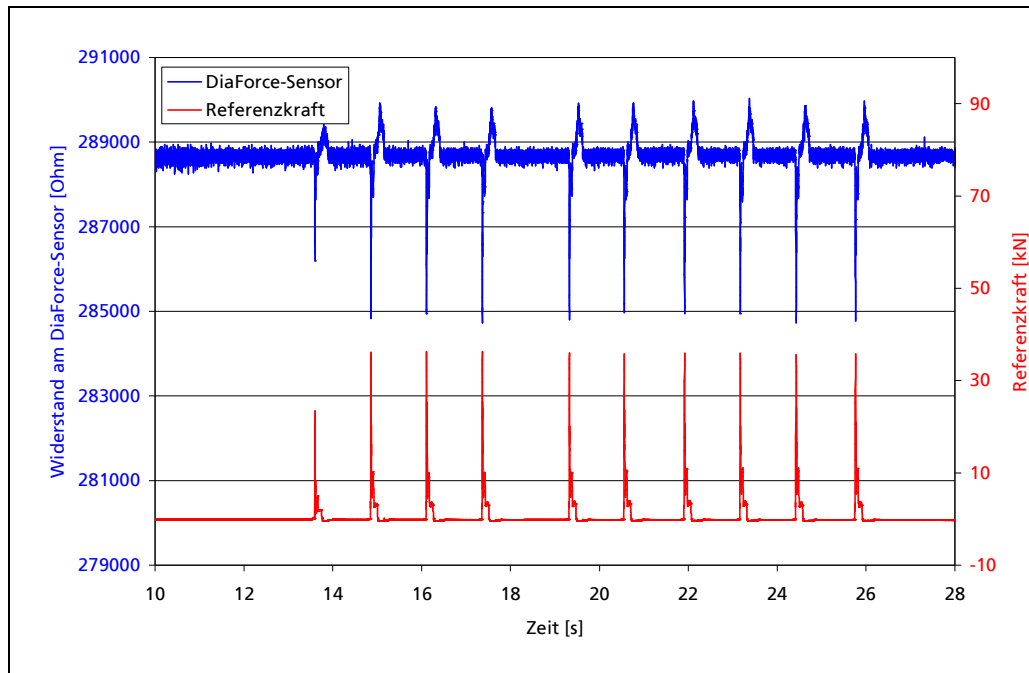


Abb. 34: Kraftmessung mit dem geschlossenen Sensorsystem

Die bis Ende 2006 aufgebauten und vermessenen Sensoren wurden mit dem Flex-Board der Version 2 versehen. Zur weiteren Optimierung wurde das Board der Version 3 entwickelt. Es ermöglichte eine einfachere Montage und Kontaktierung der Anschlussflächen (Abb. 35 und Abb. 36).

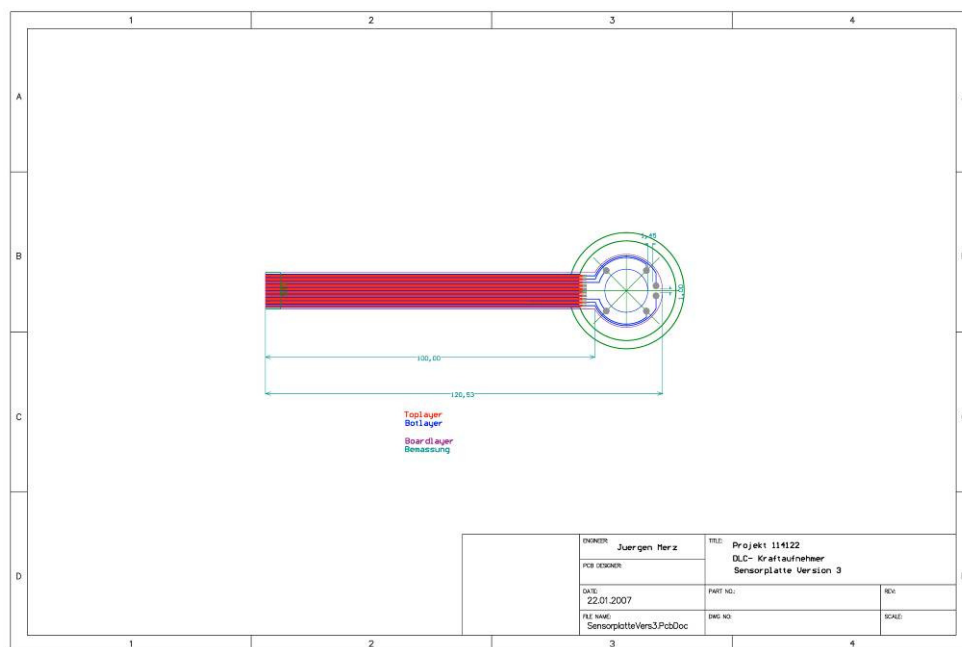


Abb. 35: Konstruktionszeichnung des Sensor- Board Version 3

Die Optimierungen betrafen folgende Aspekte des Sensoraufbaus:

- Die Anschlussflächen wurden vergrößert, rund gestaltet und mit Durchkontaktierungen versehen.

- b) Auf Lötstopplack im Kontaktbereich wurde zur Minimierung des Abstandes verzichtet.
- c) Alle Ableitungen im Sensorbereich wurden von der Sensorkontaktseite entfernt und rückseitig geführt.
- d) Im Sensorbereich wurden zusätzliche Anschlussmöglichkeiten geschaffen.



Abb. 36: Flex-Board der Version 3, hier noch ohne Ausstanzung der Gegenscheibe

3.3.8 Sensorelektronik

Zur Erfassung des Kraftverlaufes wurde eine Elektronik auf Basis eines digitalen Signalprozessors mit dazugehöriger Software entwickelt, mit der es funktional möglich ist, den Kraftverlauf auch digital aufzunehmen, zu bewerten und an ein PC-System weiterzuleiten.

Die Sensorelektronik wurde so leistungsfähig ausgelegt, dass nach Abschluss der Entwicklung der Bewertungsalgorithmen nur noch reduzierte und komprimierte digitale Daten an das Überwachungssystem zuverlässig übermittelt werden müssen. Um genügend Flexibilität für die Integration in Kontroll- und Testsystemen zu bekommen, wurde zusätzlich parallel eine Prozessschnittstelle in der Ausprägung als analoge Spannungsschnittstelle realisiert.

Anforderungen an das im Projekt zu entwickelnde Messsystem

Die mit der Sensorelektronik 1 gewonnenen Erfahrungen bildeten die Grundlage für die Definition des neuen Messsystems.

Grunddefinition

- 1) Primäres Ziel war der Aufbau eines Komplettsystems, das ohne zusätzliche Prüfgeräte in der Lage sein soll, die erfassten Daten der auf der DLC-Technologie basierenden Sensoren auszuwerten.
- 2) Die Aufbau- und Verbindungstechnik musste auf die sehr rauen Betriebsbedingungen im industriellen Anwendungsumfeld angepasst sein.

Hardwaredefinitionen

- a) Das System sollte mit denen im Maschinenbau üblichen Spannungen arbeiten. Aus diesem Grund wurde die Versorgungsspannung auf 24V(DC) festgelegt.
- b) Mehrere unabhängige Sensormodule mit jeweils bis zu drei unabhängigen Kraftmesspunkten sollten mit nur einem Sensor-System ausgewertet werden. Die Festlegung erfolgte für maximal 3 Sensormodule mit jeweils drei Kraftmesspunkten und einem Temperaturmesspunkt.
- c) Abhängig vom jeweiligen Sensoraufbau ergeben sich stark unterschiedliche Sensoreigenschaften, im Grundwiderstand, dem Skalenfaktor und dem Temperaturverhal-

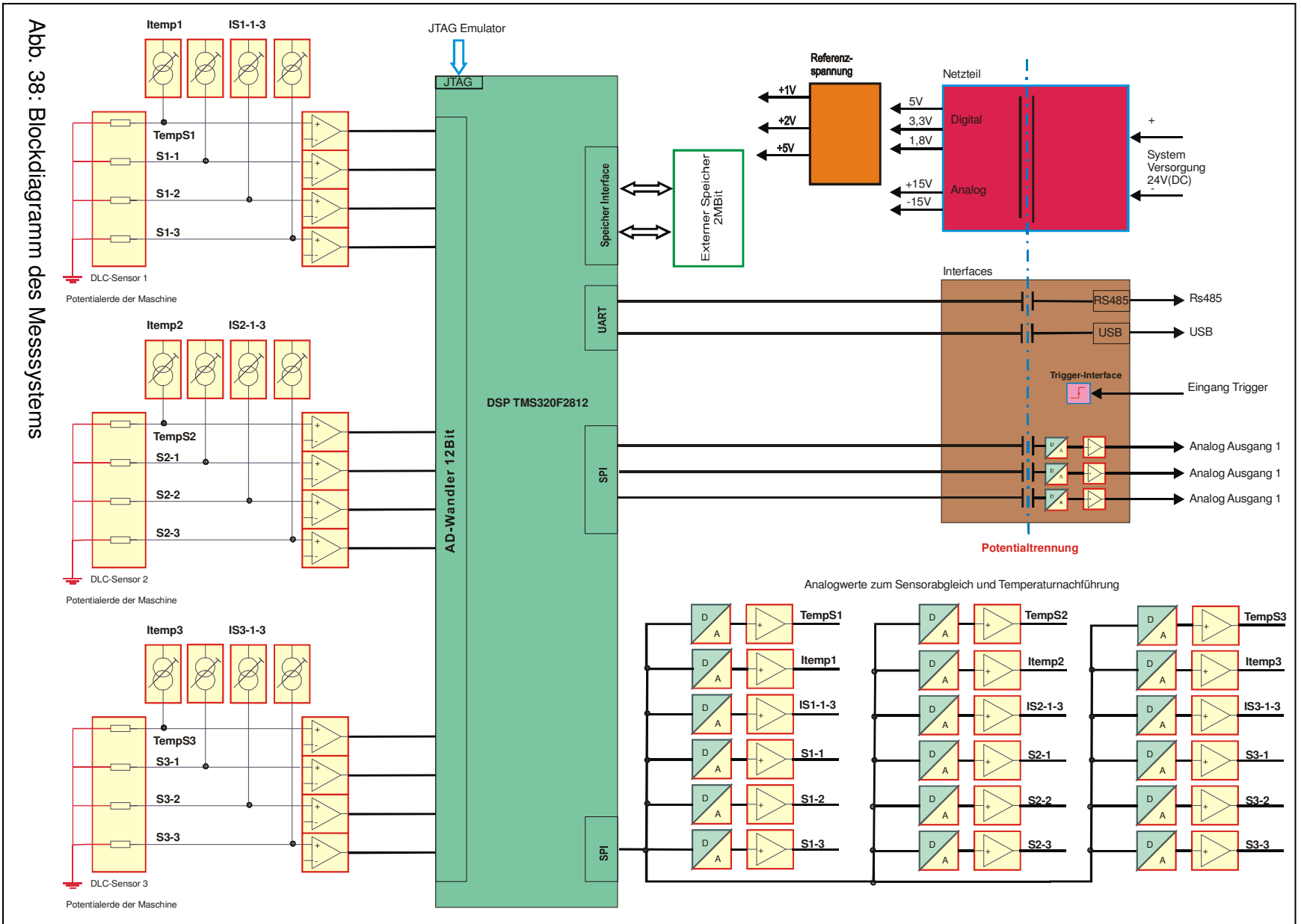
ten. Die Elektronik wurde so ausgelegt, dass eine flexible Adaption an die unterschiedlichen Sensorgegebenheiten möglich ist.

- d) Die Tatsache, dass die DLC- Sensorschichten immer mit der Potenzialerde der Maschine kontaktiert sind, wurde im Messsystem berücksichtigt. Zur Vermeidung netzbedingter Störungen war es unerlässlich, alle Ein- Ausgänge vom Anlagenpotenzial zu trennen. Diese Zielsetzung erforderte eine komplizierte Potenzialtrennung im Netzteil sowie der analogen und digitalen Schnittstellen.
- e) Die unterschiedlichen Gegebenheiten im Maschinenbau seitens der Anwender erfordern auf der Prozessebene unterschiedliche analoge und digitale Schnittstellen. Standardmäßig wurde in der Sensor-System-Projektierung eine serielle RS422/485, sowie eine analoge Schnittstelle festgelegt. Optional ist auch noch eine USB-Schnittstelle vorgesehen.
- f) Triggerereignisse werden generiert, können empfangen werden und stehen somit den Anwendungen zur Verfügung.
- g) Die Sensoren werden mit einer Frequenz von bis zu 10 kHz pro Kanal abgetastet, um der erwarteten hohen Dynamiken der Signale in den Fertigungsprozessen zu genügen.
- h) Die gemessenen Daten werden in einem ausreichend großem Speicher abgelegt und stehen dem Anwender bei Bedarf zur Verfügung. Eingesetzt wurde ein 4Mbit RAM.
- i) Zur Identifizierung der sich verändernden Prozessparameter beim Scherschneiden ist eine entsprechende Rechenleistung vorgesehen. Aus dem großen Datenvolumen sind anhand von noch zu entwickelnden Algorithmen die Kriterien für Verschleißerscheinungen zu extrahieren. Aus diesen Anforderungen ergab sich, dass nur ein digitales Signalprozessorsystem eingesetzt werden kann. Die Notwendigkeit der Speichergröße erforderte einen Rechner mit genügend großem Memory-Interface. Ausgewählt wurde der Signalprozessor TMS320F2812.
- j) Die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems wird maßgeblich von der Software bestimmt. Zunächst wurde ein Grundsystem erarbeitet, aus dessen Erfahrungen spezielle Funktionen abgeleitet werden können.

DSP-TMS 320 - Mess-System zur Analyse von Veränderungen in Fertigungs-
prozessen



Abb. 37: Hardware des Mess-Systems TMS 320



Mechanischer Aufbau

- Robustes Aluminiumgehäuse IP54 geschützt
- DIN Sensoranschlüsse IP40 geschützt
- DIN Prozessanschluss IP40 geschützt
- Industrieübliches Standardinterface

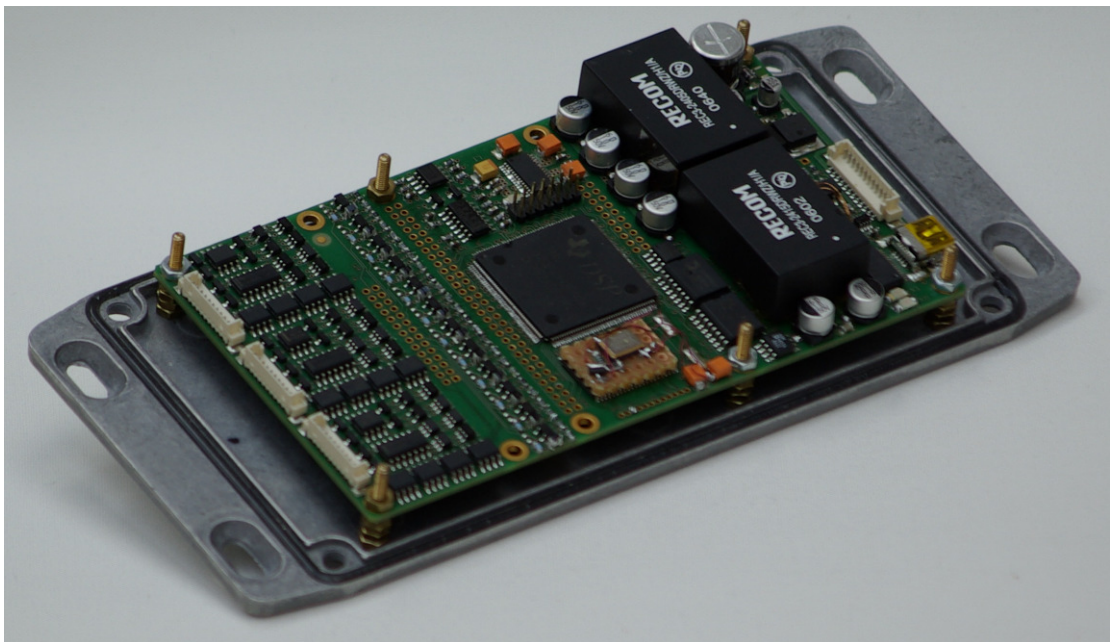


Abb. 39: Hardware System-Gehäuse

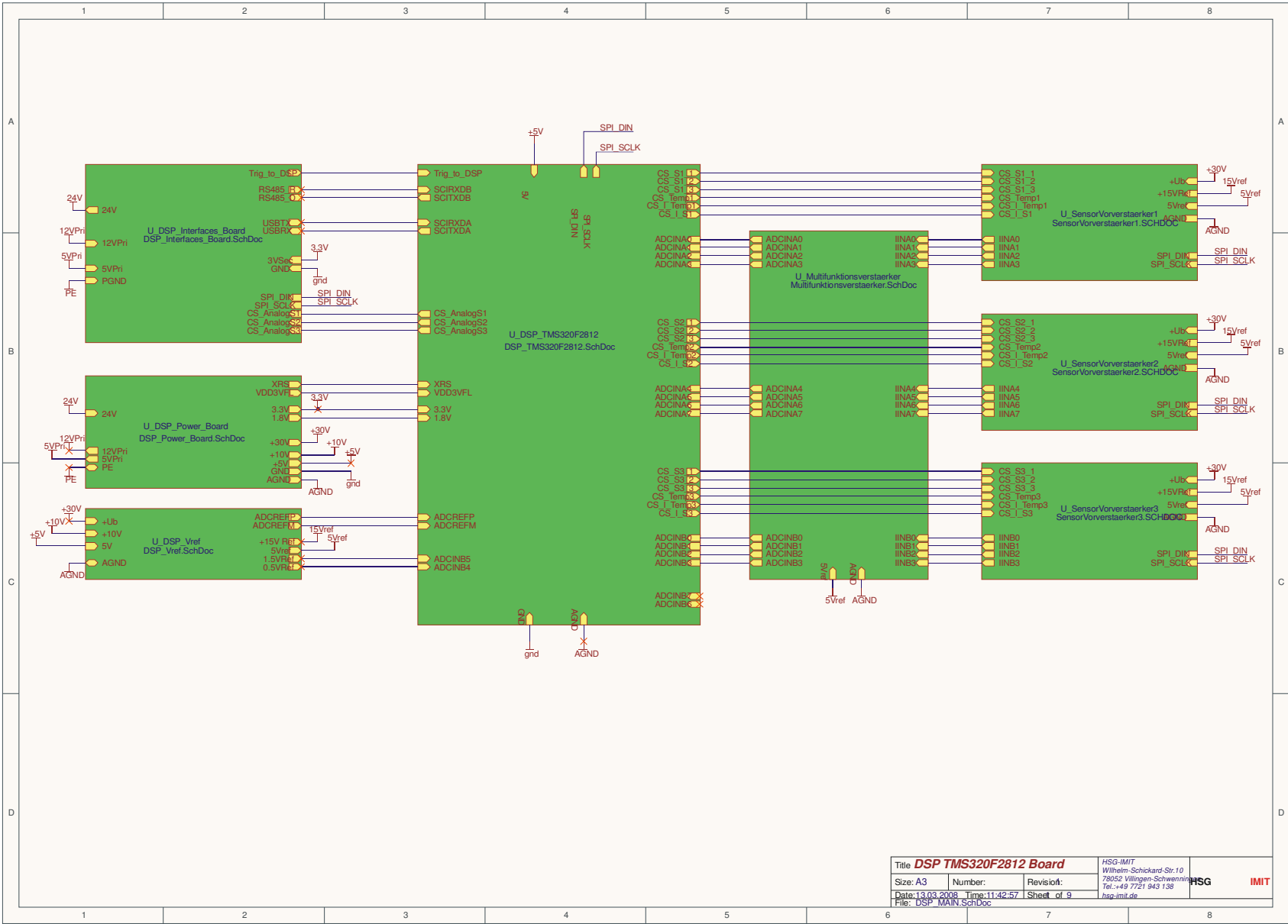


Abb. 40: Verbindungsplan der einzelnen Schaltungsteile

Sensor Vorverstärker des Sensors 1

Die Sensorverstärker 2 und 3 sind identisch und werden deshalb nicht separat beschrieben.

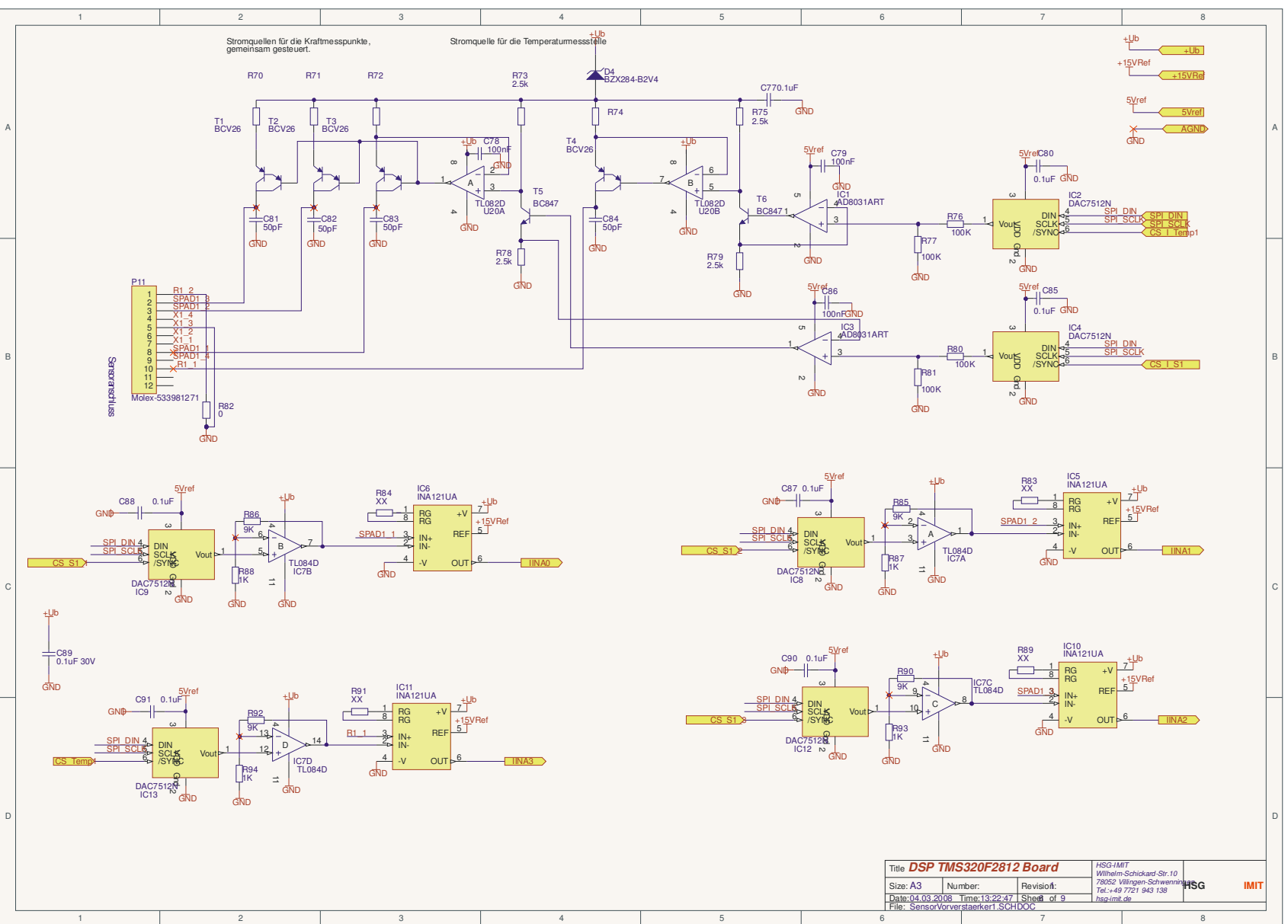


Abb. 41: Stromlaufplan des Sensorverstärkers

DSP-TMS 320 - Sensorverstärkerstufen

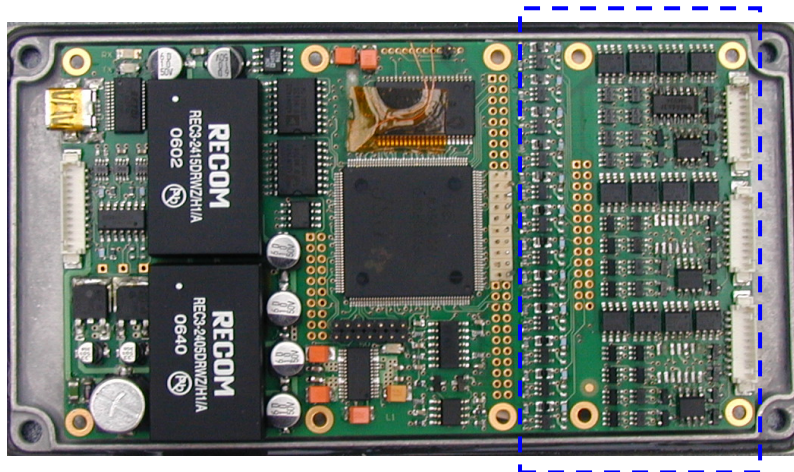


Abb. 42: Hardware DSP-TMS 320 Sensorverstärker

Eigenschaften der Verstärkerstufen

Alle Kraftmesspunkte werden mit dem gleichen Messstrom betrieben. Die Nullpunkte sind jeweils einzeln einstellbar und erlauben somit die Definition eines individuellen Nullpunktes. Der Messstrom des Temperaturfühlers ist getrennt einstellbar. Die gewählte Lösung basiert darauf, dass im Rahmen des Projekts unterschiedliche Temperatursensoren geplant waren, die eventuell unterschiedliche Versorgungsströme benötigen.

Funktionsbeschreibung des Sensorverstärkers

a) Aufbau der Sensorstromquellen

Die Transistoren T1, T2 und T3 bilden die Ausgangsstufen der Stromquelle. T3 ist die Master-Quelle und wird geregelt. T1 und T2 sind unregelte Slave-Quellen, die sich gleich verhalten wie die Quelle von T1. Der Regelverstärker bildet indem er die Spannung an R73 und R72 vergleicht. Der Transistor T5 bildet einen Spannungsspiegel, der dafür sorgt dass der Spannungsabfall an R72 gleich dem an R73 ist. Mit dem DA-Wandler IC4 wird der gewünschte Strom eingestellt. Der Stromwert kann wie folgt berechnet werden:

$$I_s = \frac{2,5V}{4095 * n * R72}$$

Beim geschlossenen System wurde R72 mit 10 kOhm bestückt. Daraus resultiert ein maximaler Strom von 250 µA, der mit 12 Bit Genauigkeit einstellbar ist. Werden andere Strombereiche benötigt, kann R70, R71 und R72 neu dimensioniert werden.

Die Diode D4 sorgt für das Einhalten der Aussteuergrenzen des IC U20A und U20B.

- b) Die Kondensatoren C81, C82 und C83 sollen verhindern, dass die Stromquelle schwingt.
- c) Die Stromquelle der Temperaturmessung ist identisch aufgebaut.
- d) Die Vorverstärker sind identisch aufgebaut. Die Beschreibung bezieht sich auf die Bausteine IC9, IC7 und IC6. Verstärkt wird das Sensorsignal durch IC6. Es verstärkt die Differenz zwischen Sensorspannung (Pin3) und der Nullpunktspannung (Pin2) mit

einem einstellbaren Faktor. Die Dimensionierung des Widerstandes R84 bestimmt die Verstärkung. Ist er offen, beträgt die Verstärkung 1.

Beim offenen System beträgt der Faktor 1 und beim geschlossenen System Faktor 10. Die Nullpunktspannung kann digital abgeglichen werden. Dies geschieht mit dem DA-Wandler IC 9 und dem Verstärker IC7B.

- e) Die Spannungsbereiche sind so ausgelegt, dass die maximale Spannung am Sensor ca. 25 V betragen kann.

Multifunktionsverstärker

Eigenschaften

Dieser Funktionsblock bildet das Interface zwischen den Sensorverstärkern und den Eingängen des Analogmultiplexers. Die Sensorsignale, die zwischen 0 V bis 25 V betragen können, werden auf die Eingangsbedingungen des AD-Wandlers angepasst.

Funktionsbeschreibung

Da alle Verstärkerstufen identisch aufgebaut sind, wird die Funktionsweise exemplarisch am Verstärker IC40 erklärt.

- a) Der OP IC40 arbeitet, je nach Bestückung, als invertierender und nichtinvertierender Verstärker. In der derzeitigen Variante wird er als invertierender Verstärker beschaltet. Die Bauelemente R145, R146, R165 wurden nicht bestückt. Die Bauelemente R151, R152 und R164 sind wie angegeben bestückt.

Der jeweilige Aufbau der Verstärker muss in der Software berücksichtigt werden.

- b) Der AD- Wandler stellt für die analogen Eingangsgrößen eine zyklische, kapazitive Last dar. Um zu verhindern, dass es zu verfälschten Messsignalen kommt, wird IC40 zusätzlich als Impedanzwandler benötigt.
- c) Die analoge Eingangsspannung wird invertiert und um den Faktor 0,1 verstärkt.
- d) R157 und C127 bilden einen einfachen TP-Filter am Eingang des AD-Wandlers.
- e) Die Diode D7 schützt den Eingang des AD- Wandlers vor Eingangsspannungen > 3,6 V.

Referenzspannungserzeugung

Eigenschaften

Innerhalb der Elektronik sind mehrere analoge Referenz- Spannungen notwendig.

Funktionsbeschreibung der Referenzerzeugung

- a) Kernbaustein der Referenzerzeugung bildet das IC U18, das eine stabile Spannung von 2,5 V erzeugt.
- b) Aus dieser Spannung werden durch Verstärkung alle notwendigen Spannungen (0,5 V, 1 V, 1,5 V, 2 V, 5 V und 15 V) abgeleitet. Durch diese Maßnahme ist gewährleistet, dass alle Referenzen der Drift der 2,5 V Referenz in etwa folgen.

Multifunktionsverstärker

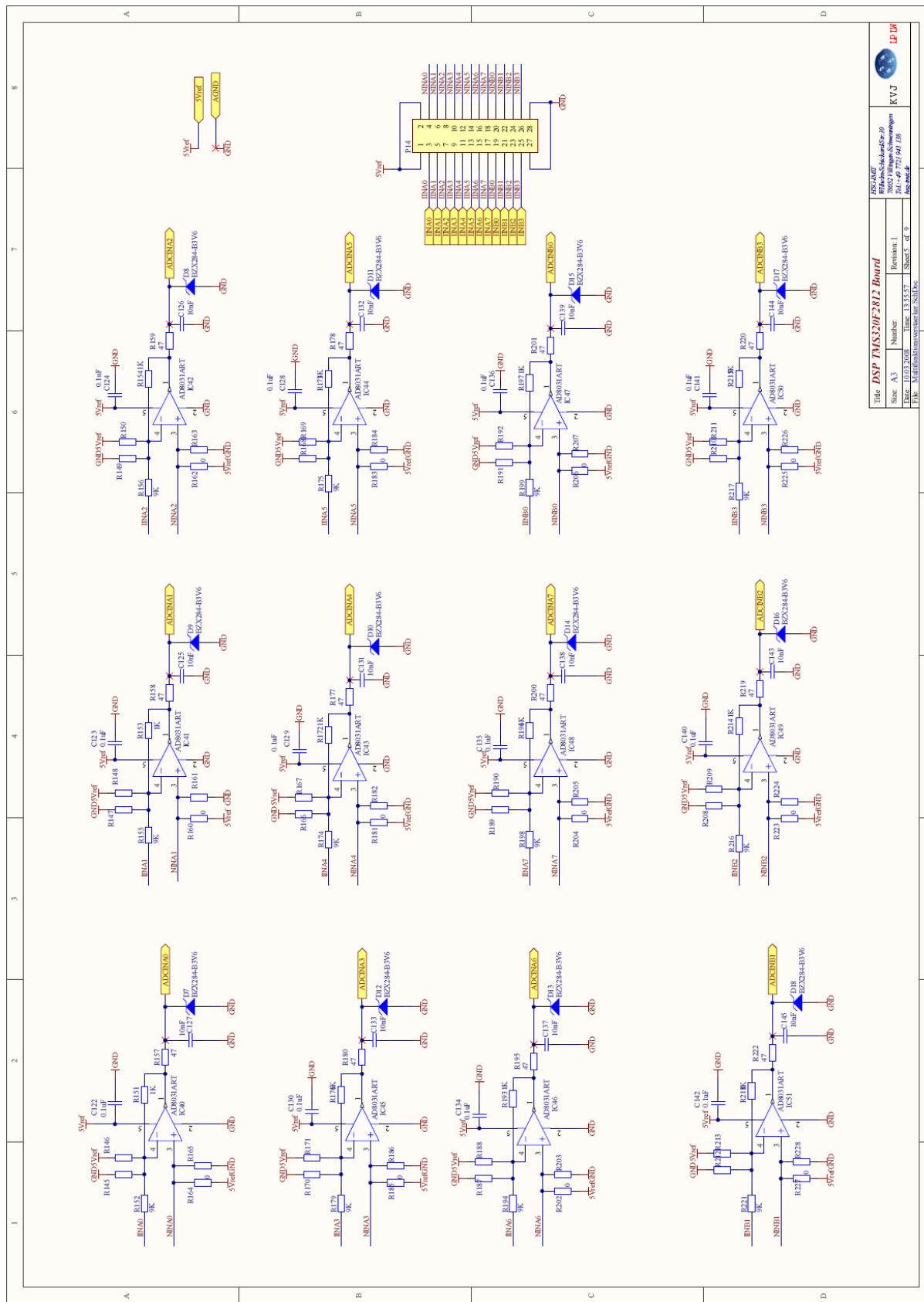


Abb. 43: Stromlaufplan des Multifunktionsverstärkers

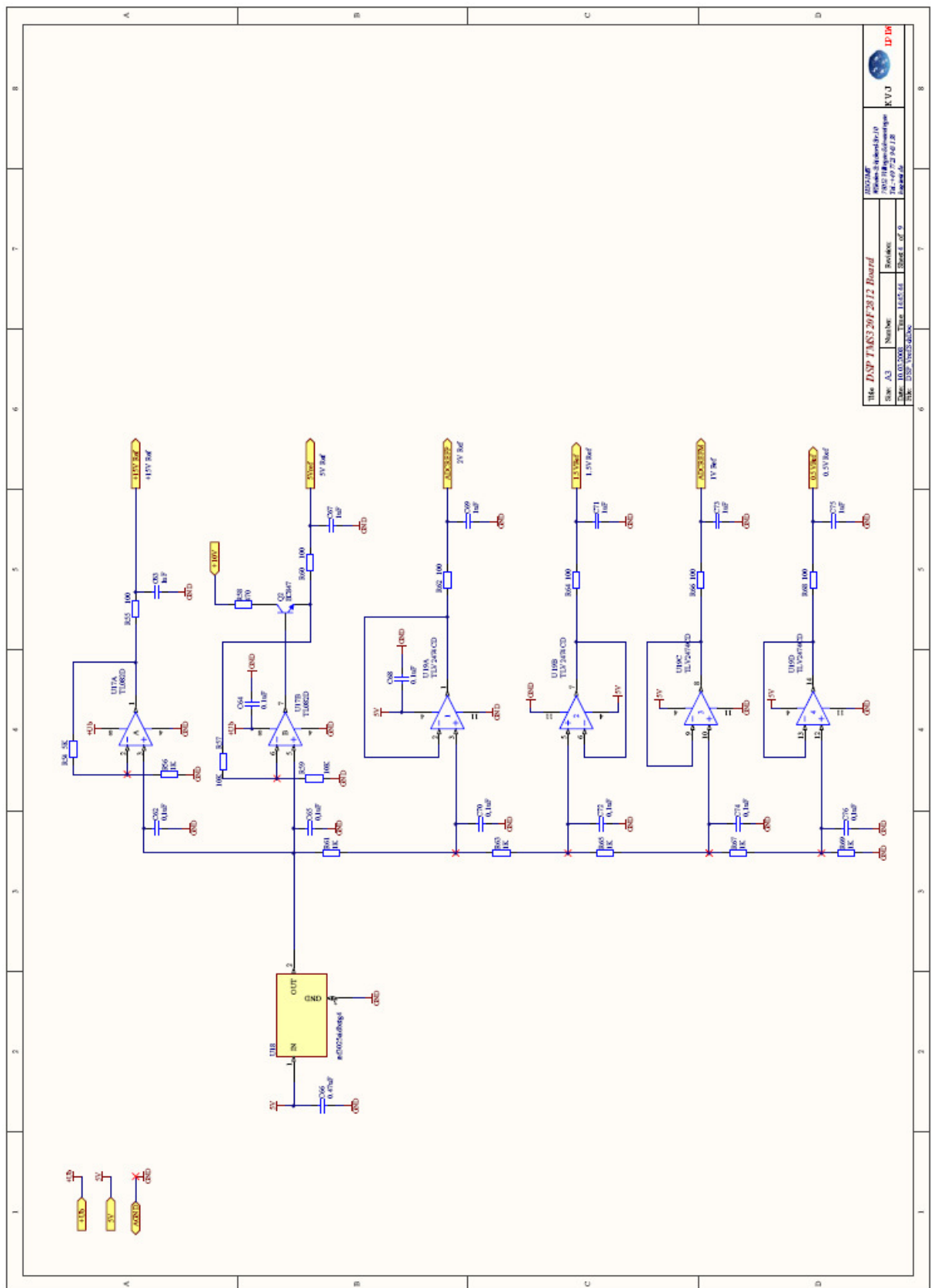


Abb. 44: Stromlaufplan der Referenzspannungserzeugung

DSP-TMS 320 Prozessorschaltung

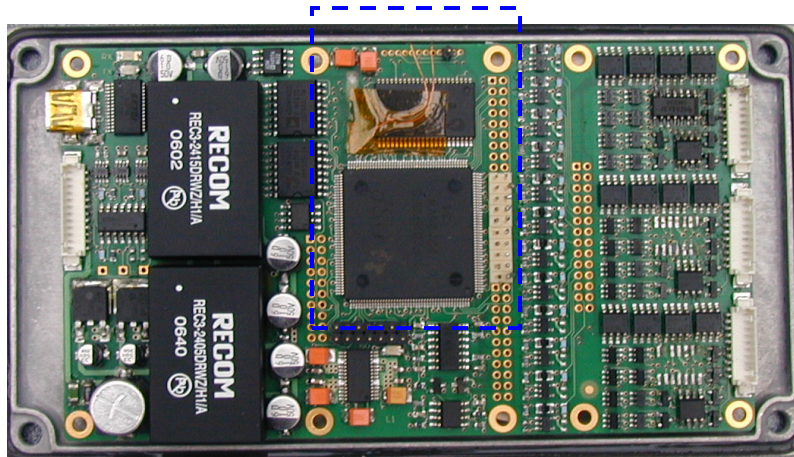


Abb. 45: Hardware DSP-TMS 320 Prozessorschaltung

Eigenschaften

Abb. 46 zeigt die Grundbeschaltung um den Signalprozessor, die den Prozessor selbst und das Speicher- Interface umfasst. Zusätzlich sind alle Schnittstellen und Bussystem definiert und zentral zum Prozessor geführt.

Funktionsbeschreibung

- a) Die Funktionsblöcke U15A, B und C sind Bestandteile des Prozessors. Der Block 15A stellt das komplette digitale und analoge Interface dar.
- b) In Funktionsblock U15B ist die Versorgung des Signalprozessors definiert.
- c) Der Block U15C bildet das JTAG- Interface, das zum Programmieren und Debuggen der Software benötigt wird.
- d) Der Datenspeicher (RAM) ICU16 ist direkt mit dem Speicher- Interface des Prozessors verbunden.
- e) Die Widerstände R46 bis R51 dienen der Konfiguration des Systems. Hier wird bestimmt, von welchem Speicher das Betriebssystem bootet.
- f) Der Quarz Y1 erzeugt einen Takt, aus dem der wählbare Systemtakt von 120MHz abgeleitet wird. Da es Lieferprobleme gab, wurde der Quarz gegen einen entsprechenden Quarzoszillator ausgetauscht.

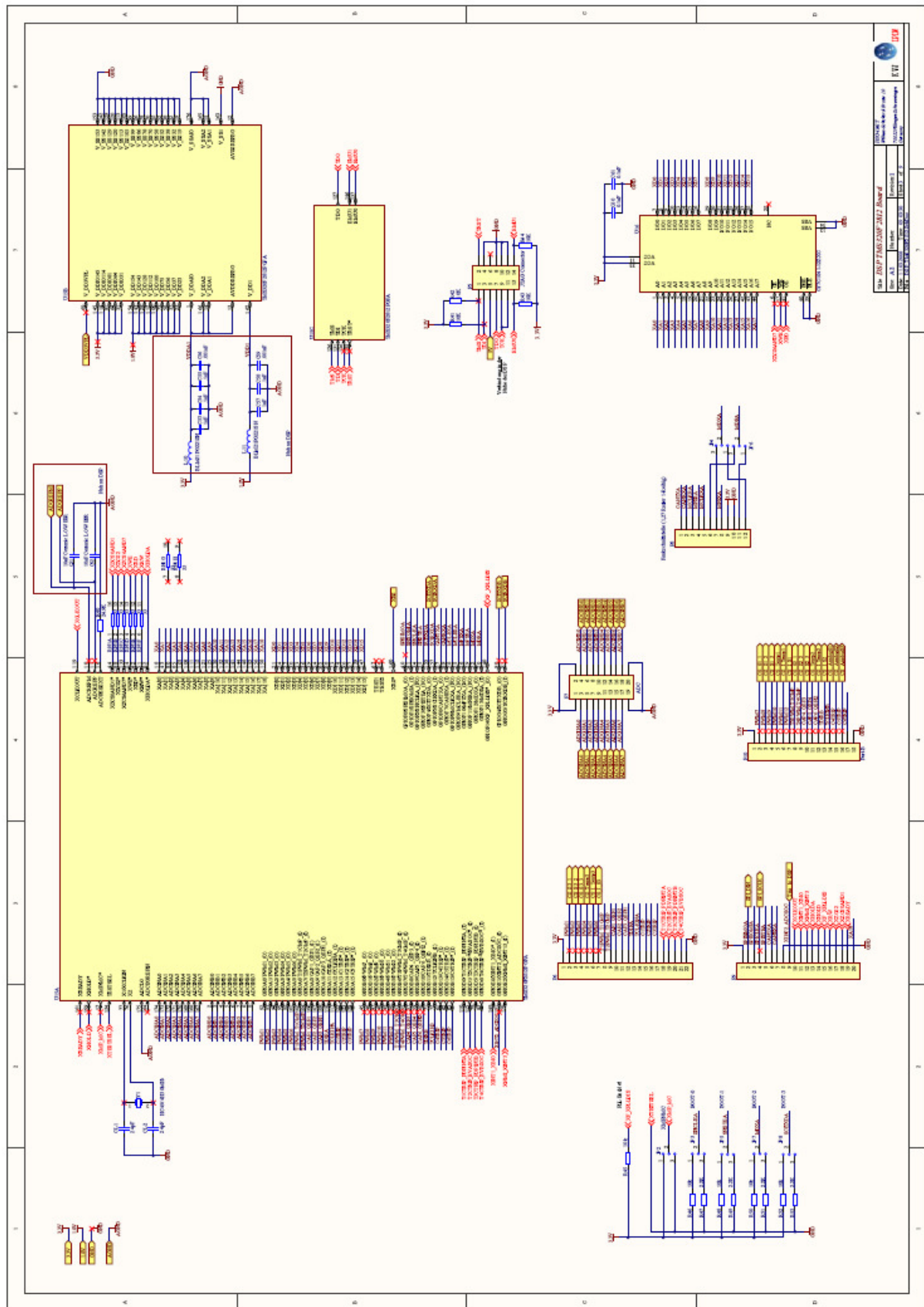


Abb. 46: Stromlaufplan der Prozessorschaltung

DSP-TMS 320 - Interface- Schaltung und Power-Board-Funktion

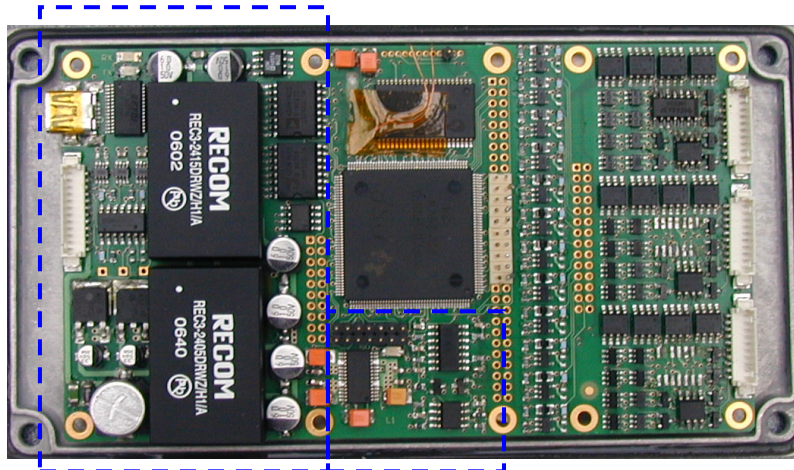


Abb. 47: Hardware DSP-TMS 320 - Interface- Schaltung

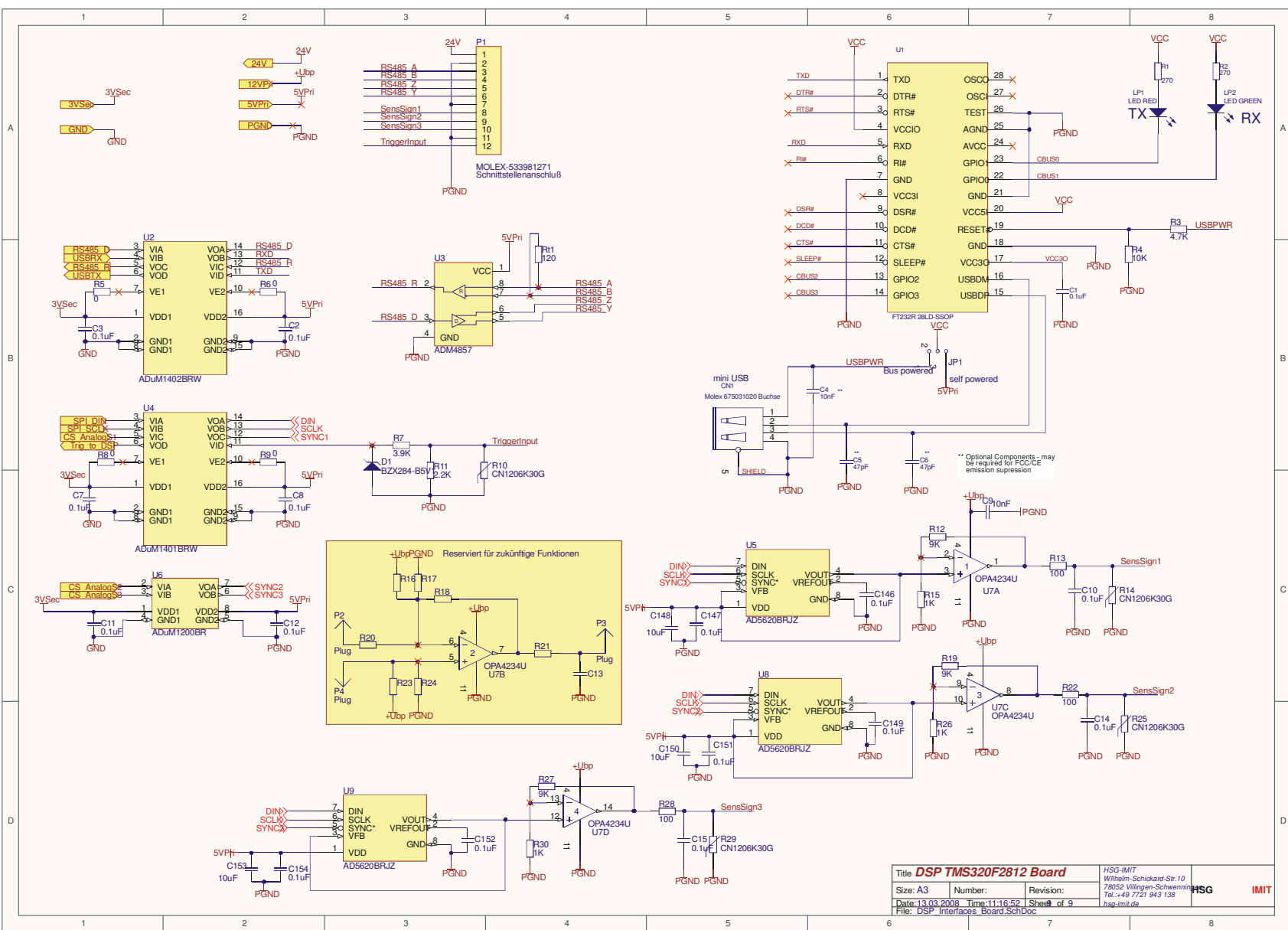
Eigenschaften

Dieser Funktionsblock bildet die physikalische Schnittstelle zur Kommunikation mit der Außenwelt. Alle analogen wie digitalen Schnittstellen sind in diesem Block verschaltet. Die eingangs erwähnte notwendige Potenzialtrennung ist in diesem Schaltungsblock berücksichtigt.

Funktionsbeschreibung

- a) Die Bauteile U2, U4, U6 trennen das Primär- vom Sekundär-Potenzial. Alle digitalen Verbindungen werden durch diese Bausteine geführt und Potenzial-getrennt.
- b) Die Leitungstreiber der RS-485- Schnittstelle befinden sich im Bauteil U3. Sie ist als 4fach-Leitungstreiber ausgeführt und ermöglicht den Voll-Duplex- Betrieb.
- c) Die AD-Wandler (U5, U8 und U9), mit den dazugehörigen Verstärkern, erlauben es dem Anwender sensorspezifische Größen analog weiterzuverarbeiten.
- d) Die USB-Schnittstelle ist mit dem Baustein U1 realisiert. Sie bietet dem Anwender die Möglichkeit, das System auch über USB bedienen zu können.
- e) Der Baustein U7B ist noch nicht benutzt und kann frei verschaltet werden.

Abb. 48: Stromlaufplan der Interfaceschaltung



DSP- TMS 320 Power-Board-Funktion

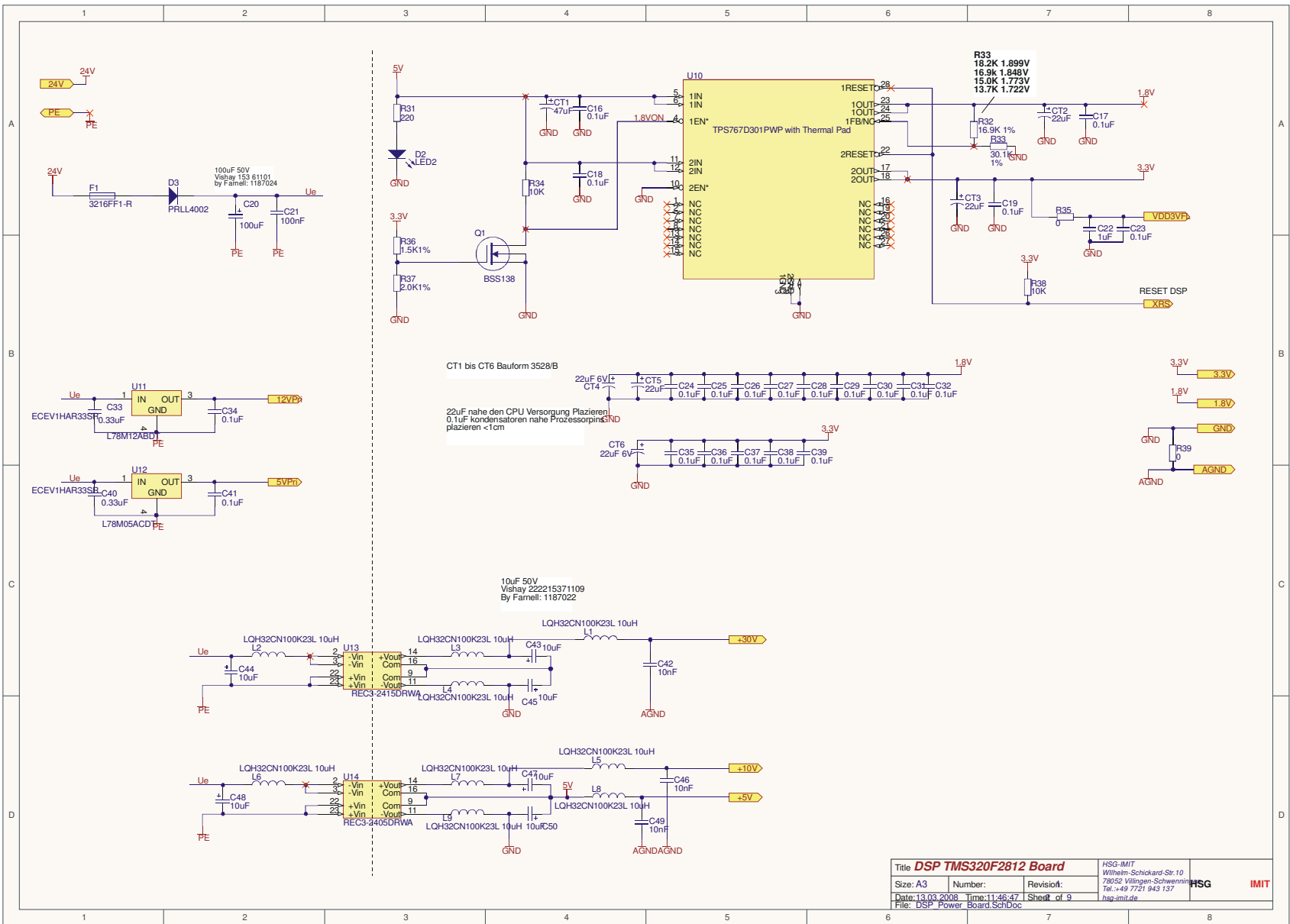
Eigenschaften

Für die korrekte Funktion des DSP-Prozessors ist die Einhaltung der Spezifikationen, die die Spannungsversorgung betreffen, extrem wichtig. Stimmt die Power-Sequenz nicht, kann das System beim Ein- bzw. Ausschalten zerstört werden. Diese Funktionalität ist auf dem Board realisiert.

Funktionsbeschreibung

- a) Die Bauelemente U11 und U12 stellen die Versorgung der primären Komponenten sicher.
- b) Die Sicherung F1 und die Diode D1 sichern das System gegen Falschpolung und Überstrom.
- c) Die DC- Konverter U13 und U14 erzeugen die notwendigen sekundären Spannungen und trennen zugleich das primäre vom sekundären Potenzial.
- d) U10 stellt die Einhaltung des Power-Sequenz sicher und beinhaltet gleichzeitig die Reset-Generierung.

Abb. 49: Stromlaufplan des DSP-Power Board



3.3.9 Abgleich der Online-Kraftmessung mit der Prozesssimulation

Mit dem Finite-Elemente-Programm DEFORM[®]-2D V9.0 wurde das Schneiden eines 1 mm dicken Bleches (Werkstoff 1.4301) berechnet. Das Startnetz mit 5.000 finiten Elementen wurde während des Prozesses in der Schneidzone verfeinert. Zusätzlich zum elastisch-plastischen Materialmodell kam das Versagenskriterium nach COCKROFT und LATHAM zum Einsatz, dass die Trennung des Werkstoffes steuerte (Abb. 50).

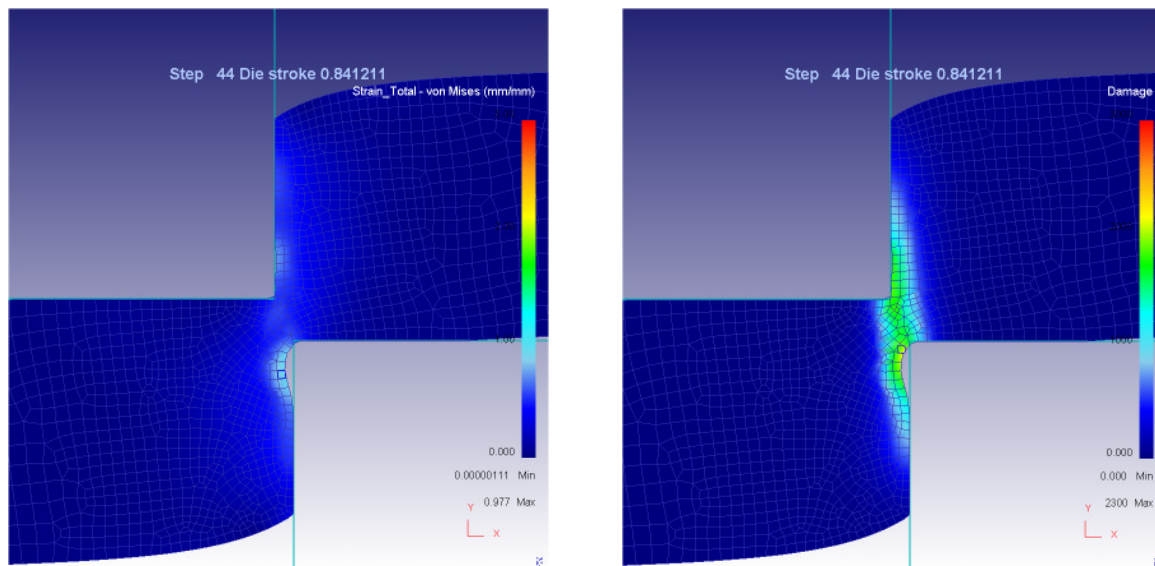


Abb. 50: links: von Misesche Vergleichsdehnung, rechts: Schädigung nach COCKROFT-LATHAM am Stempel mit Radius

Der Versagensgrenzwert D des COCKROFT-LATHAM-Kriteriums wurde durch einen Abgleich der FE-Simulation mit experimentellen Schneidversuchen (Abb. 51) bestimmt. Es zeigte sich eine gute Übereinstimmung der simulativ ermittelten Kraftmaxima mit dem Realversuch ($F_{S,max,sim} = 37,6 \text{ kN}$; $F_{S,max,exp} = 36,3 \text{ kN}$).

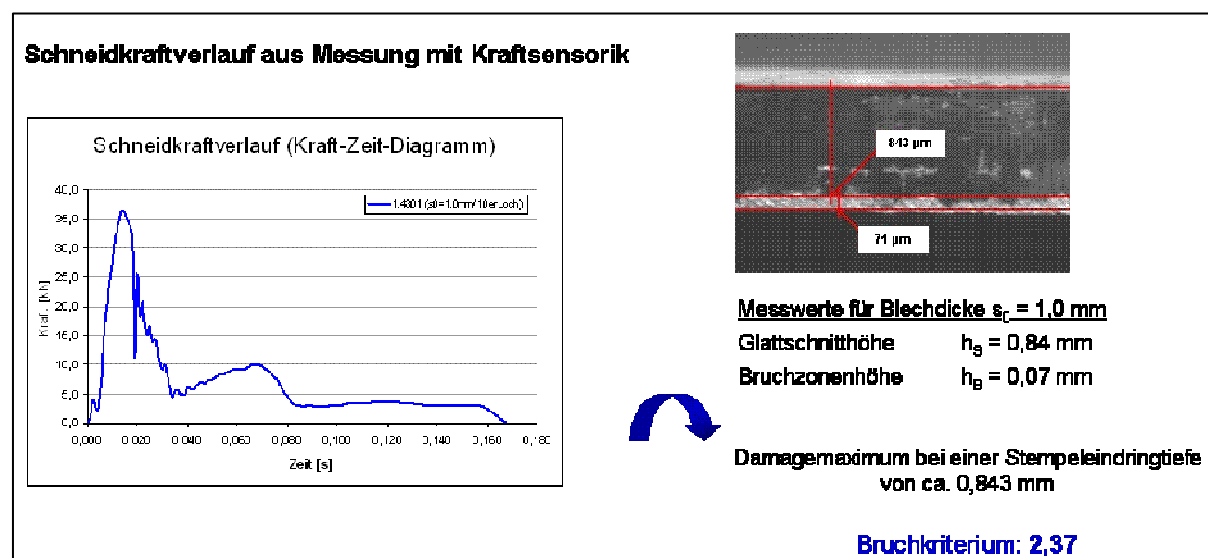


Abb. 51: Parameter aus dem realen Schneidprozess

3.3.10 Optimierung der Dünnschichtsensorik

Die geplanten Optimierungen erfolgten hinsichtlich der Lage der Messpunkte und des Werkzeuges. So wurde beispielsweise eine Reduzierung der Messpunkte von vier auf drei vorgenommen, um eine gleichmäßigere Belastung der Punkte durch die Reduzierung des „Kippelpotenzials“ zu gewährleisten. In Bezug auf eine möglichst gleichmäßige Vorspannung der Druckplatte zum Werkzeug wurden feste Spaltmaße definiert, damit der Stempelkopf möglichst senkrecht auf dem Sensor steht. Die Dicke der Sensorscheiben wurde auf 2 mm erhöht, um die Sensorscheiben besser gegen Eindrücke durch den Stempelkopf zu schützen und um die volle Höhe des Kunststoffgehäuses auszunutzen. Als neues Substratmaterial erfolgte der Einsatz von Edelstahl. Der Schichtaufbau des offenen und des geschlossenen Systems aus 3.3.2 blieb gleich.

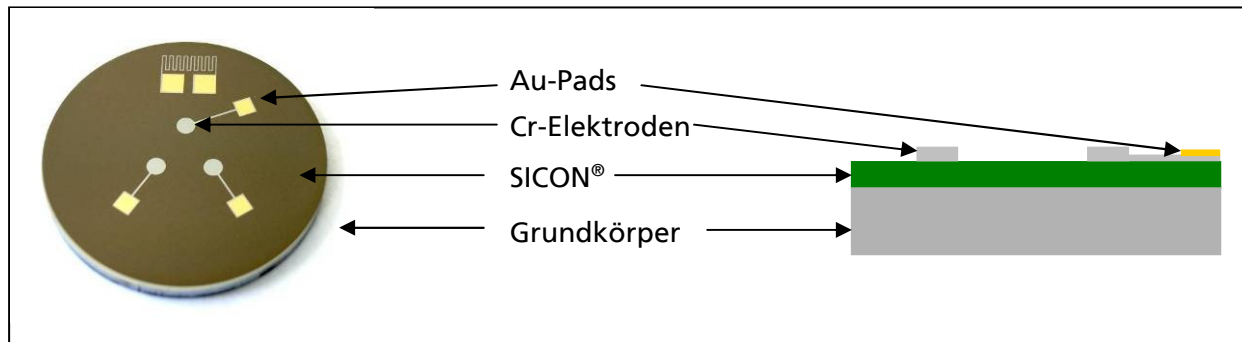


Abb. 52: Schichtaufbau Sensorscheibe (offenes System)

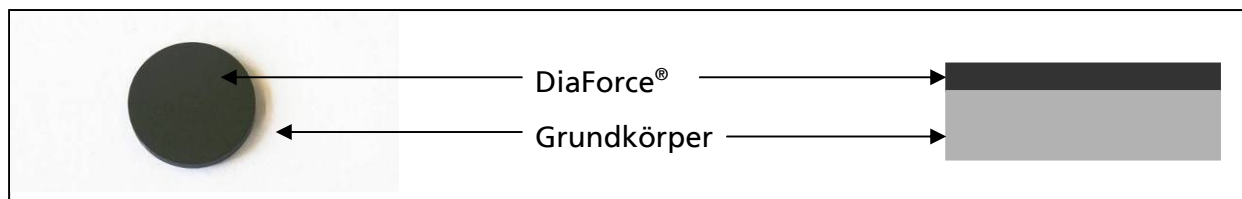


Abb. 53: Schichtaufbau Gegenscheibe (offenes System)

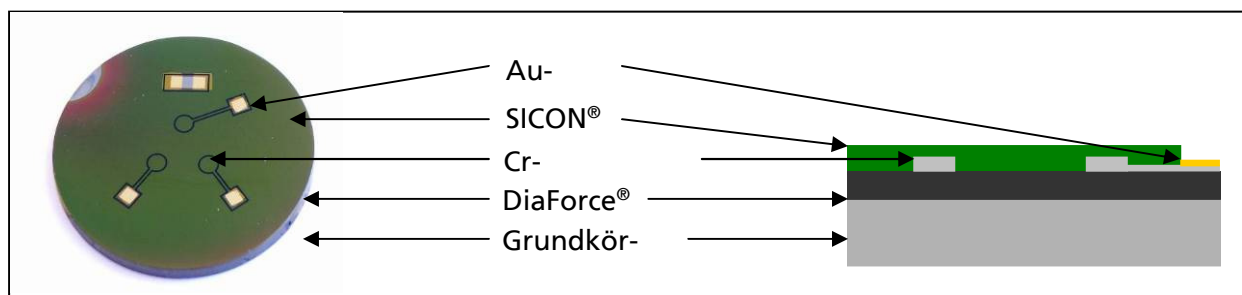


Abb. 54: Schichtaufbau Sensorscheibe (geschlossenes System)

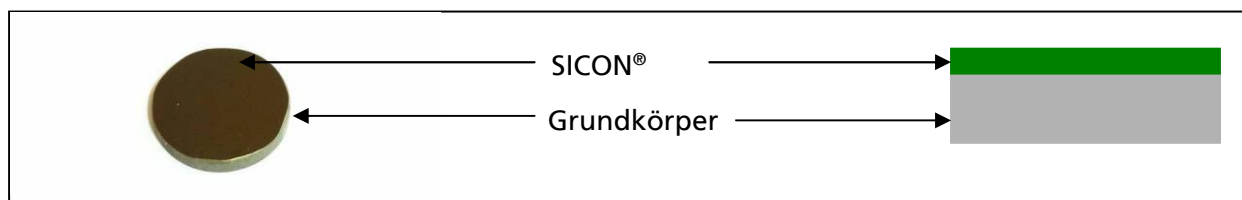


Abb. 55: Schichtaufbau Gegenscheibe (geschlossenes System)

Die Lage der Au-Pads wurde beibehalten, so dass das bereits entwickelte Sensorboard zur Kontaktierung der Messpunkte weiter verwendet werden konnte.

Während der Projektbearbeitung hat sich herauskristallisiert, dass die Aufbau- und Verbindungstechnik zur Ableitung der elektrischen Signale der Sensorschichten von elementarer Bedeutung ist. Nachfolgend werden deshalb die im Projekt verfolgten Lösungen näher beschrieben:

Kontaktierung der Sensormodule

Auf der Sensorschicht befinden sich elektrisch leitende Elektroden, die mit der Elektronik verbunden werden. Die Zuverlässigkeit dieser Verbindung ist qualitätsbestimmend und mit entscheidend für die zu erreichende Standzeit der Sensorik. Für die elektrische Verbindung zwischen Elektronik und Sensor sind derzeit mehrere Interfacestellen vorhanden:

- a) Verbindung zwischen Elektronik und Verbindungskabel (DIN) - ist mit einem 12poligen DIN- Stecker versehen
- b) Verbindung zwischen DIN- Kabel und flexiblem Ableitersubtrat - ist durch ein Verbindungsleiterplatte mit Stecker realisiert
- c) Verbindung zwischen flexiblem Ableiter und (Au, Cr) Kontaktelektrode auf dem Sensor
- d) Die Verbindung zwischen Kontaktelektrode und Kraftmesspunkt erfolgt durch Cr-Leiterbahnen, der eigentliche Kraftmesspunkt besitzt ebenfalls eine Cr-Elektrode.

Während die Verbindungen a) und b) mechanisch und elektrisch relativ unkritisch sind, erwiesen sich die Verbindungen c) und d) als problematisch (). Beide Interfacestellen befinden sich direkt am Sensor und sind starken mechanischen Belastungen ausgesetzt.

Bei der Verbindung c) und d) besteht die Gefahr, dass sie durch die vor Ort bestehenden mechanischen Beanspruchungen zerstört werden.



Abb. 56: Interfacestellen a, b und c

Für die Verbindung c) wurden folgende Kontaktierungen getestet:

a) Klemmende Verfahren

Die erste Ausführung der Klemmverbindung war für das offene Sensorsystem ausgelegt. Auf dem Substratträger sollten sowohl die Elektroden wie auch die Leiterbahnen aufgebracht werden. Für dieses Verfahren wurde die Leiterplatte Flex-Board 1 aus Polyimid (D = 0,2 mm) entwickelt (Abb. 57).

Abb. 57: Flex-Board 1 mit vier Elektroden

Abb. 58: Flex- Board 1 aufgelegt auf

- 1 Elektrodenstruktur der Kraftmesspunkte
- 2 Anschlüsse des Temperatursensors
- 3 Interfacepunkte für zukünftigen direkten Anschluss von Leiterbahnstrukturen auf dem Sensorsubstrat

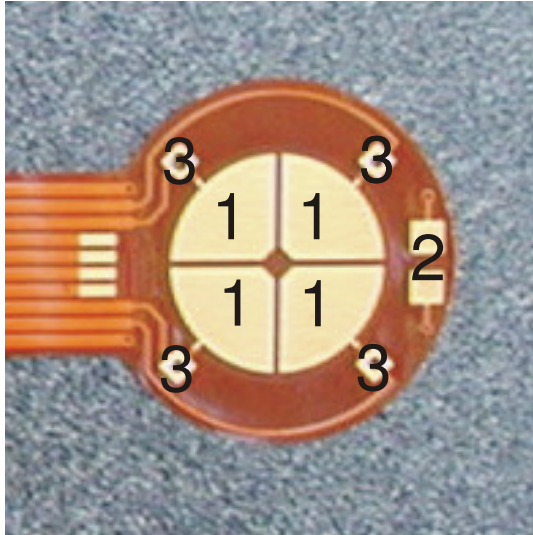


Abb. 57: Flex-Board 1 mit vier Elektroden



Abb. 58: Flex- Board 1 aufgelegt auf Sensorstruktur

Es war klar, dass das Trägermaterial aus Polyimid nicht dauerhaft den Kräften standhalten kann. Dennoch wurden mit diesem Aufbau erste Kraftmessungen erfolgreich durchgeführt. Die Kontaktkraft wurde direkt von der zu messenden Kraft aufgebracht. Bei der Konstruktion des Flex-Boards wurden die Interfacepunkte 2 und 3 bereits mit eingeplant. Die zentrische Elektrodenstruktur wurde dabei durch Lochstanzung entfernt.

Die in Abb. 58 dargestellte Kontaktierung ist sowohl für das offene System wie auch die geschlossene Variante einsetzbar. Die Vorspannung wurde durch eine aufgelegte Polymerfolie erzeugt. Der ganze Sandwichaufbau war mit der Druckplatte und der Sensorhalteplatte verschraubt. Da es vom Handling sehr schwierig war diesen Aufbau in die Druckplatte einzusetzen, wurde ein darauf abgestimmtes Gehäuse entwickelt.

Trotz erfolgreicher Messungen war dieses Verfahren nicht geeignet, die Verbindung zu den Sensorstrukturen dauerhaft sicherzustellen. Aus diesem Grund wurden alternative Kontaktierungsverfahren gesucht, die dauerhaft die Kontaktierung gewährleisten.

b) Verbindungen mit leitfähigen Klebstoffen

Für die elektrische Verbindung werden in der Industrie schon seit einiger Zeit elektrisch leitende Klebstoffe eingesetzt. Diese Klebstoffe basieren in den meisten Fällen aus Mehrkomponenten-Klebstoffen mit leitenden Füllmaterialien wie Gold, Silber und Graphit. Am HSG-IMIT wurde für solche Klebungen der Klebstoff Epo-eck H20S erfolgreich eingesetzt. Dieser mit Silber gefüllter Klebstoff erreicht nach dem Aushärten einen hohen Leitwert bei gleichzeitig hoher Haftfestigkeit.

Durch Dispensierung wurde der Kleber auf die Kontaktstellen aufgebracht und ausgehärtet. Zur weiteren mechanischen Stabilisierung wurde mittels Epoxyd Kleber das Flex-Board mit dem Sensor verbunden.

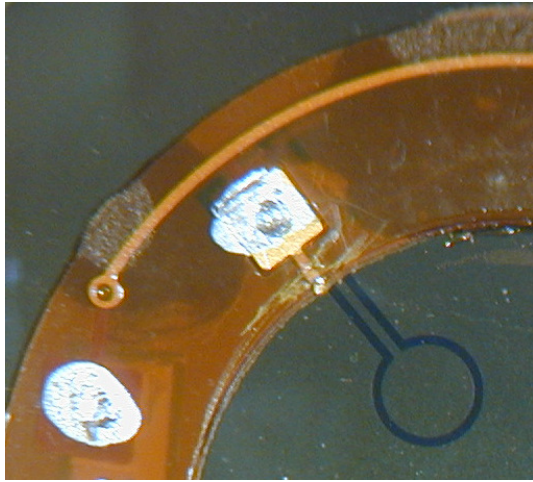


Abb. 59: Kontaktierung der Sensorpunkte mit silberhaltigen Klebstoffen

Grundsätzlich war die Verbindung erfolgreich. Es stellte sich jedoch heraus, dass die Haftfähigkeit den Beanspruchungen des Dauerbetriebes nicht gewachsen war. Es kam zu Abplatzungen des Klebstoffes von der Sensorschicht. Die Veränderung des Leitwertes mit zunehmender Alterung konnte ebenfalls nicht ausgeschlossen werden.

Diese Art der Kontaktierung eignet sich aus genannten Gründen nicht für den Aufbau einer langzeitstabilen Sensorkomponente.

c) Kontaktierung mit Hilfe elektrischer Kontakte

In elektrischen Schaltern werden Kontaktbleche mit langlebigen Kontaktlegierungen schon seit langer Zeit erfolgreich eingesetzt. Auch die Verbindung von Akkus, Batterien und anderen Bauelementen sind so aufgebaut.

Deshalb wurde, aufbauend auf den Erfahrungen mit dem Sensorgehäuse und dem Flex-Board, ein elektromechanischer Kontakt entwickelt, der direkt auf die Sensorkontaktfläche drückte (Abb. 60). Die elektrischen Eigenschaften erwiesen sich als gut und der Aufbau war einfach zu handhaben. Das Kontaktblech wurde direkt an das Flex-Board angelötet.

Von Nachteil war, dass die Kontakte vorgespannt sein mussten und die Vorspannung vom Gehäuse getragen wurde. Aus diesem Grund wurde der Sensor unter Vorspannung mit dem Gehäuse verklebt. Mehrere Sensorenkomponenten konnten in dieser Ausprägung erfolgreich getestet werden. Im Dauertest stellte sich aber heraus, dass die mechanische Beanspruchung die Kontaktflächen der Sensoren schädigten und zu frühzeitigen Ausfällen führten. Aufgrund dessen wurde diese Art der Kontaktierung nicht weiter verfolgt.

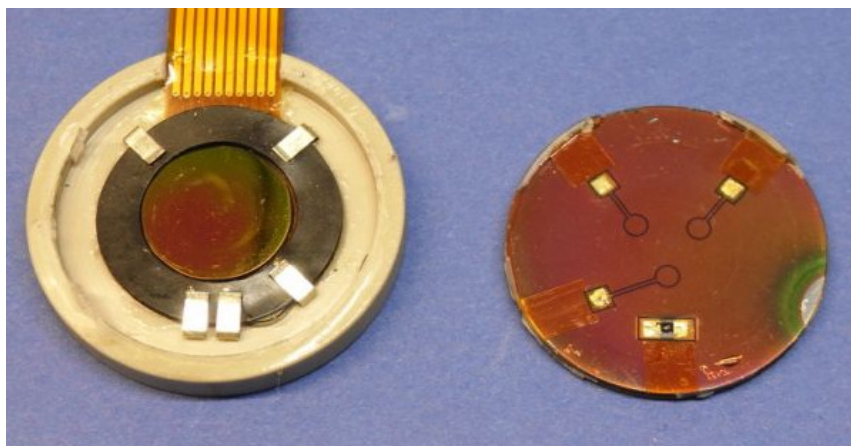


Abb. 60: geöffneter Sensor mit elektromechanischen Kontakten

d) Kontaktierung durch Lötverfahren

Es lag nahe, die elektrischen Verbindungen durch gängige Lötverfahren herzustellen. Versuche mit den bestehenden Schichtaufbauten waren in der Vergangenheit wenig erfolgreich gewesen. Bedingt durch die geringen Schichtdicken der Goldauflage konnte keine dauerhafte und prozesssichere Verbindung hergestellt werden. Abb. 61 zeigt eine vergoldete Kontaktfläche vor und nach dem Lötversuch. Während des Lötvorgangs löste sich die Goldschicht chemisch im Lot auf. Auf der freiliegenden Chromschicht konnte das Lot nicht mehr haften.

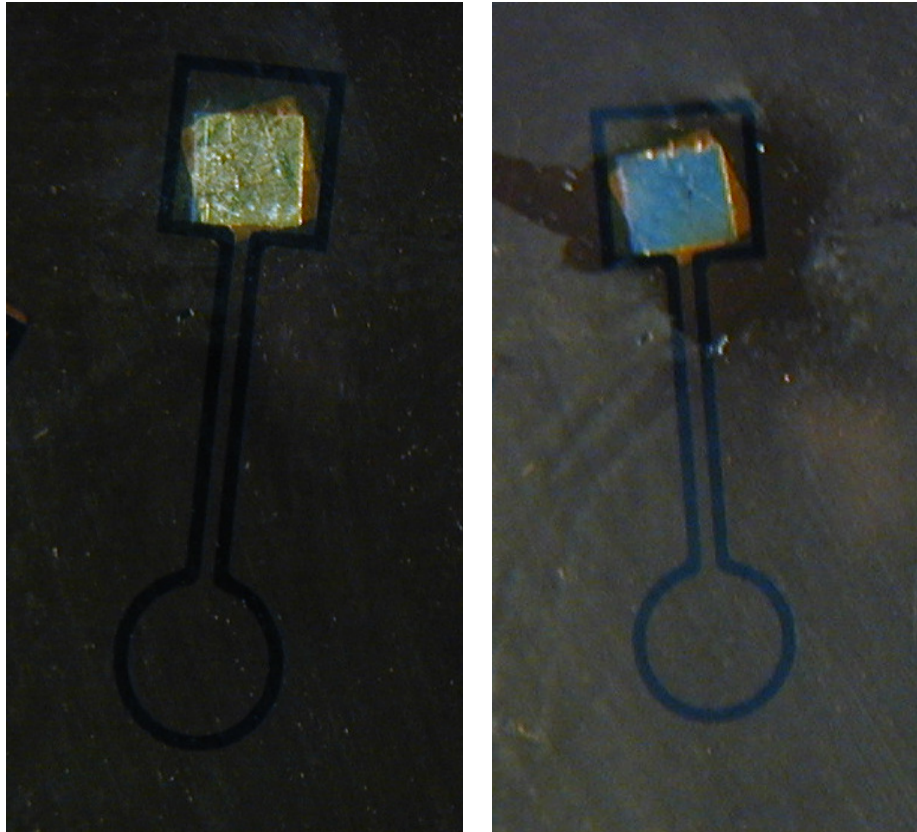


Abb. 61: Elektrode vor und nach versuchtem Lötprozess

Festzustellen bleibt, dass sich in Bezug auf die Kontaktierung im vorgegebenen Bearbeitungszeitraum für die Praxis relevante Lösungen nur in Ansätzen evaluieren ließen, die für eine belastbare Projektion hinsichtlich einer späteren Produktausprägung herangezogen werden könnten. Wenn es gelingt, den Schichtaufbau der Elektroden an den Lötprozess anzupassen, stellt das Lötverfahren die sicherste Verbindungsart dar.

Zukünftige Perspektiven zur Stabilisierung des Fertigungsprozesses:

Angedacht sind auf Basis veränderter Schichtaufbauten technologisch, qualitativ gute Voraussetzungen zu schaffen, um die darauf aufbauenden Lötprozesse bzw. Laserlötverfahren, verbunden mit eventuell notwendigen Drahtbondprozessen, sicher durchführen zu können.

3.3.11 Langzeitversuche

Die Langzeitversuche sollten das Verhalten der Sensorschicht und der Aufbau- und Verbindungstechnik unter Produktionsbedingungen simulieren. Für dieses Vorhaben wurde die Auswertelektronik der HSG-IMIT erweitert.

Zur Durchführung der Schneidversuche wurde vom IWU ein Dreifachwerkzeug entwickelt, das sowohl für die Verwendung verschiedener Stempeldurchmesser als auch unterschiedlicher Schneidstempelwerkstoffe konzipiert ist. Die Konstruktionsbasis des Werkzeuges bilden die Normen der Strack Norma GmbH (Abb. 62).

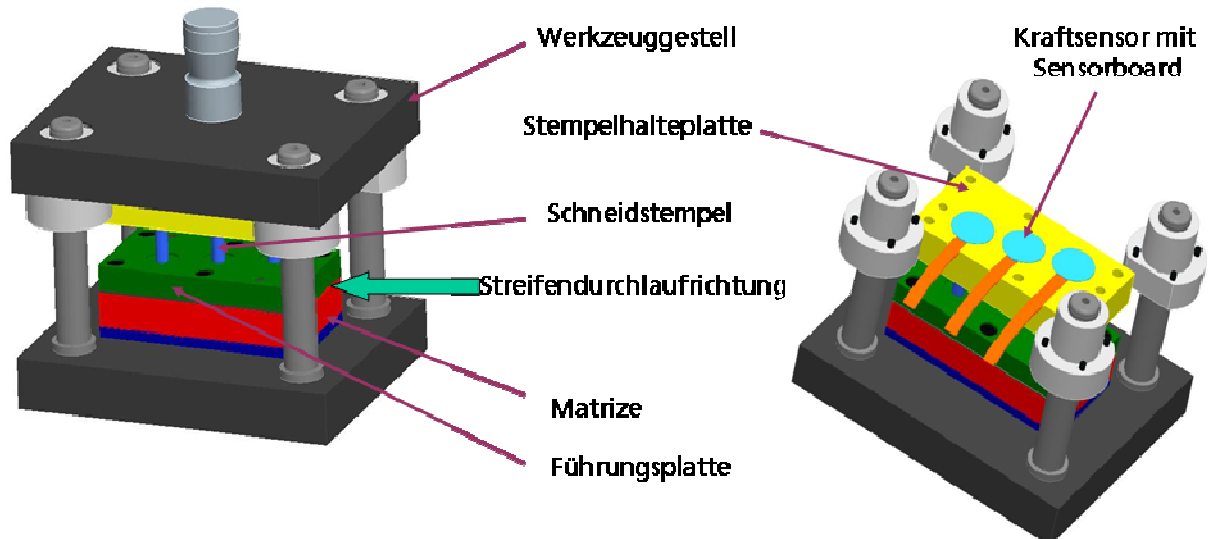


Abb. 62: Aufbau des Dreifachwerkzeuges

Ziel der Versuche war es, die Kennlinien des Kraftverlaufs für mehrere Schneidstempel aufzunehmen und eine mögliche gegenseitige Beeinflussung zu analysieren. Hierfür war die Variierung von Blechwerkstoffen sowie der Durchmesser der Schneidstempel und der Sensoraufbauten vorgesehen.



Abb. 63: Dreifachwerkzeug mit verschiedenen Schneidstempeldurchmessern

In die Stempelhalterplatte wurden zunächst Schneidstempel mit unterschiedlichem Durchmesser (6, 8, 10 mm) eingesetzt, wobei für jeden Schneidstempel ein geschlossener Sensoraufbau im Kraftfluss verbaut werden soll. Die Stempelhalterplatte und die Druckplatte wurden mit eingesetzten Stempeln und Sensoren verstiftet und über sechs M8 Schrauben verbunden. Dabei ergab sich zwischen den beiden Platten ein Spalt von ~ 1mm. Die miteinander verschraubten Stempelhalter- und Druckplatten werden am Oberteil des Werkzeuges befestigt und anschließend das komplette Werkzeug in die Presse eingebaut. Die Kontaktierung der Sensoren erfolgt über eine Steckverbindung zum Flex-Board und einer Maschinenmasse (Abb. 64).

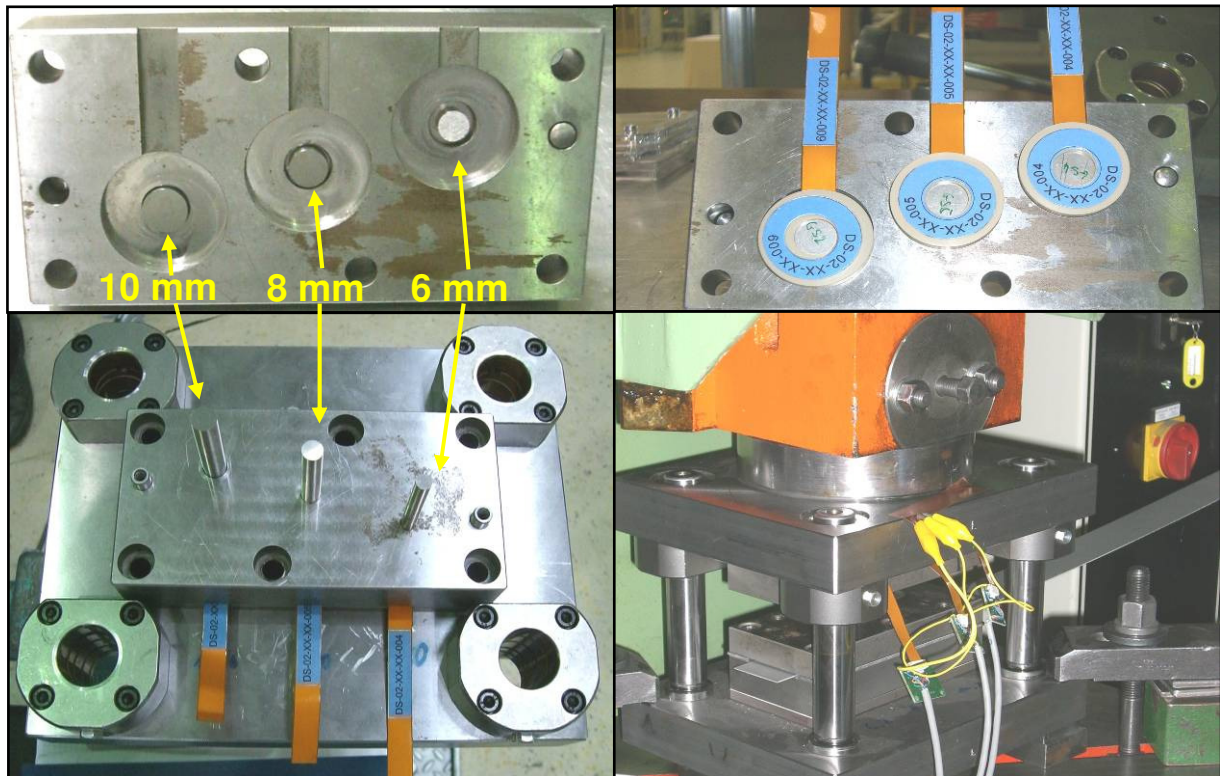


Abb. 64: Stempelhalterplatte mit drei Lochstempeln, eingesetzte Sensoren, montiertes Werkzeugoberteil, Einbau in der Presse PEEV 25.2

Mit dem Ziel der Realisierung exakter Messergebnisse bei den Dauerschneidversuchen wurde das Werkzeug dahingehend überarbeitet, dass drei Schneidstempel mit einem Durchmesser von 10 mm verwendet werden konnten. Da teilweise die aufgenommenen Kraftverläufe mit den im Einzelwerkzeug aufgenommen Kurven nicht in Übereinstimmung zu bringen waren, erfolgte die weitere Versuchsdurchführung unter Nutzung des Werkzeuges Werkzeug als Einfachwerkzeug, wobei das Werkzeug-Oberteil des Einfachwerkzeuges und die mittlere Matrize des Dreifachwerkzeuges kombiniert wurden (Abb. 65).

Getestet wurden auf diese Weise sowohl offene als auch geschlossene Sensoraufbauten im Kraftfluss. Die Kontaktierung der Sensoren erfolgt wieder über eine Steckverbindung zu den Flex-Bändern und einer Maschinenmasse.



Abb. 65: Einfachwerkzeug mit 10 mm Stempel

3.3.12 Auswertungen

Die Messungen haben gezeigt, dass mit beiden Sensorsystemen der Kraftverlauf der Schneidvorgänge gemessen werden konnte, wobei das offene System im Gegensatz zum geschlossenen generell eine höhere Empfindlichkeit aufwies. Auch die Auswertungen mit der von der HSG-IMIT entwickelten Auswerteelektronik waren erfolgreich.

In den ersten Langzeitversuchen konnte bei Verwendung von Schneidstempeln mit einem Durchmesser von 10 mm festgestellt werden, dass die Wahl des Werkzeugs einen Einfluss auf die Sensorcharakteristik hat. So ist die Empfindlichkeit des gleichen Sensors bei gleichen Schneidbedingungen im Einfachwerkzeug deutlich größer als beim Dreifachwerkzeug (Abb. 66 und Abb. 67). Dies lässt darauf schließen, dass bei Verwendung des Dreifachwerkzeugs der Kraftfluss nicht optimal von den Sensorflächen aufgenommen werden kann. Sie liegen somit eher im Kraftnebenschluss.

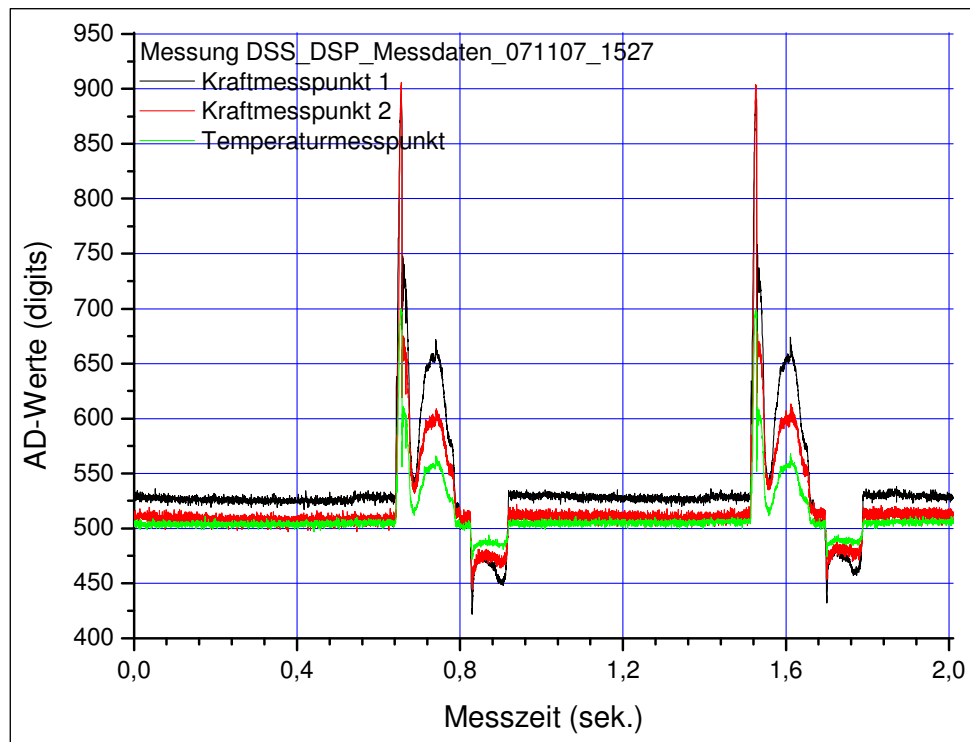


Abb. 66: Schneidversuche 1mm Alu, Schneidkraft ca. 16kN im Einfachwerkzeug

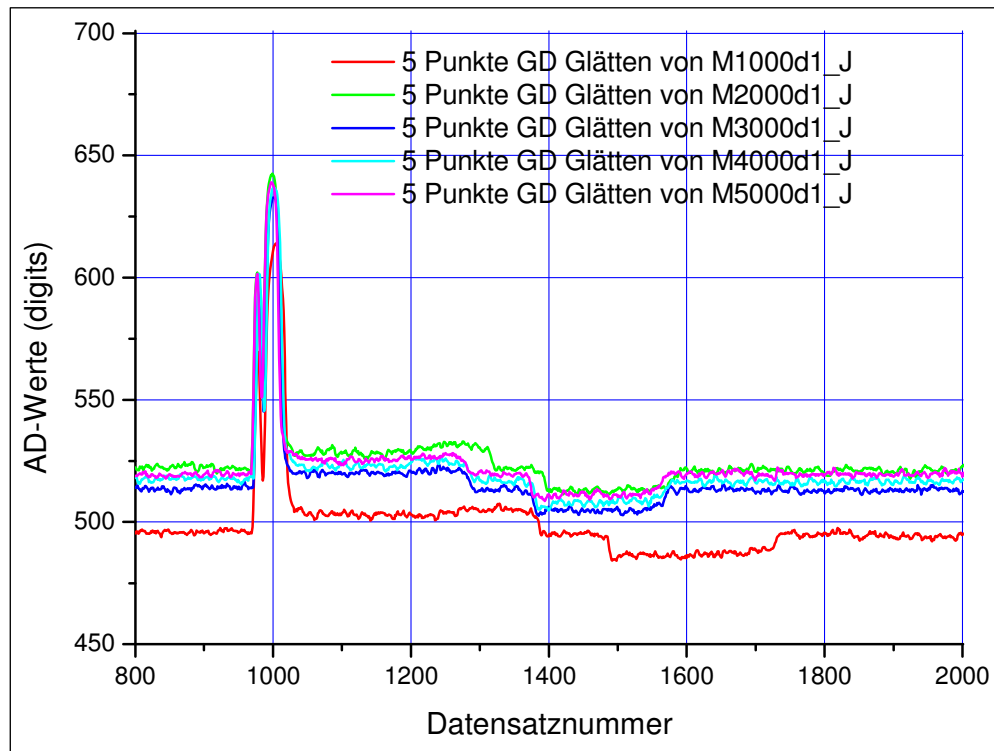


Abb. 67: 5000 Schneidversuche 1mm Alu, Schneidkraft ca. 16kN im Dreifachwerkzeug

Weiterhin ist zu sehen, dass sich die Sensorcharakteristik auch über 5000 Schneidversuche nicht signifikant ändert (Abb. 67). Jedoch wurden bei entsprechender Anzahl an Schnitten Sensorausfälle registriert. Nach Öffnung der Sensorsysteme konnten mehrere Faktoren festgestellt werden, die zum Sensorausfall führen:

Erstens wurden Probleme in der Aufbau- und Verbindungstechnik sichtbar. Der elektrische Kontakt zwischen Flex-Board und Au-Pad wurde durch einen Metallkontakt realisiert (Abb. 68).

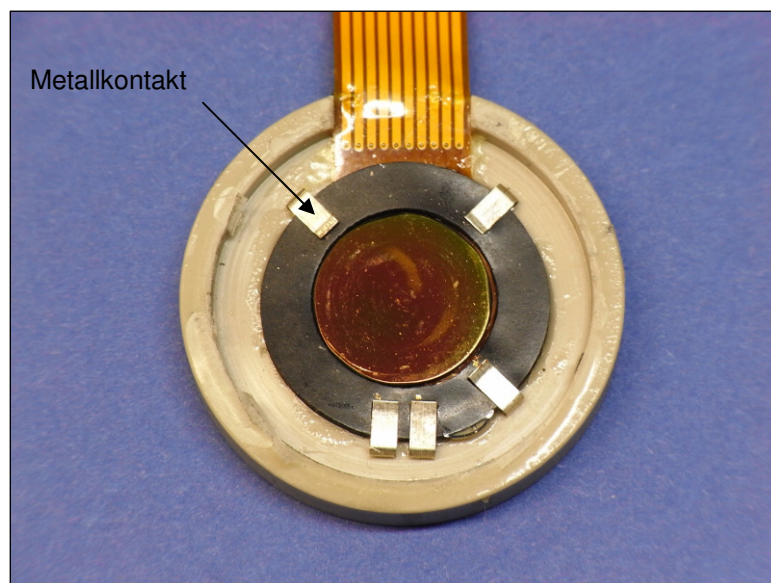


Abb. 68: Flex-Board mit Metallkontakten

Durch die mechanische Verpressung und die Vibrationen während des Schneidprozesses kam es zum Abrieb der elektrisch leitfähigen Schichten der Kontaktpads. Dadurch wurde die elektrische Verbindung unterbrochen (Abb. 69).

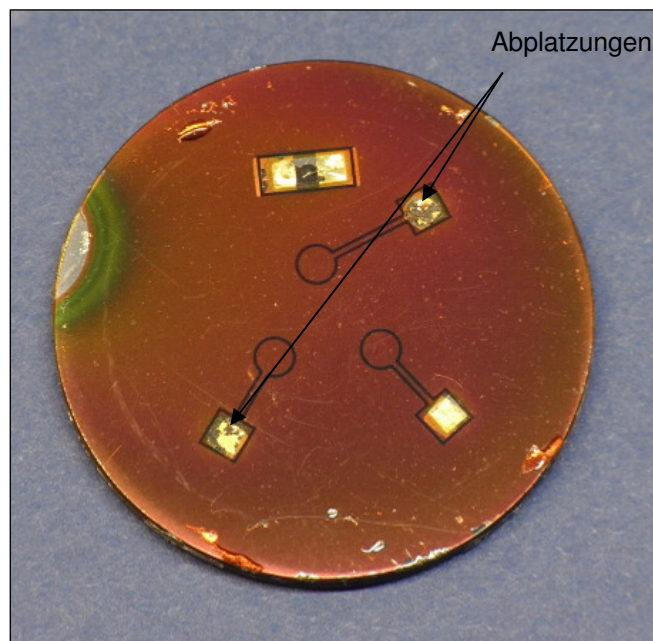


Abb. 69: Abrieb an den Kontaktpads

Zweitens konnten Probleme mit dem Stahl-Substrat festgestellt werden. Durch die Belastungen beim Schneidprozess konnte eine Vertiefung von ca. 25 μm in der Sensorscheibe festgestellt werden. Dies lässt darauf schließen, dass das Material der Sensorscheibe zu weich gewählt wurde (Abb. 70).

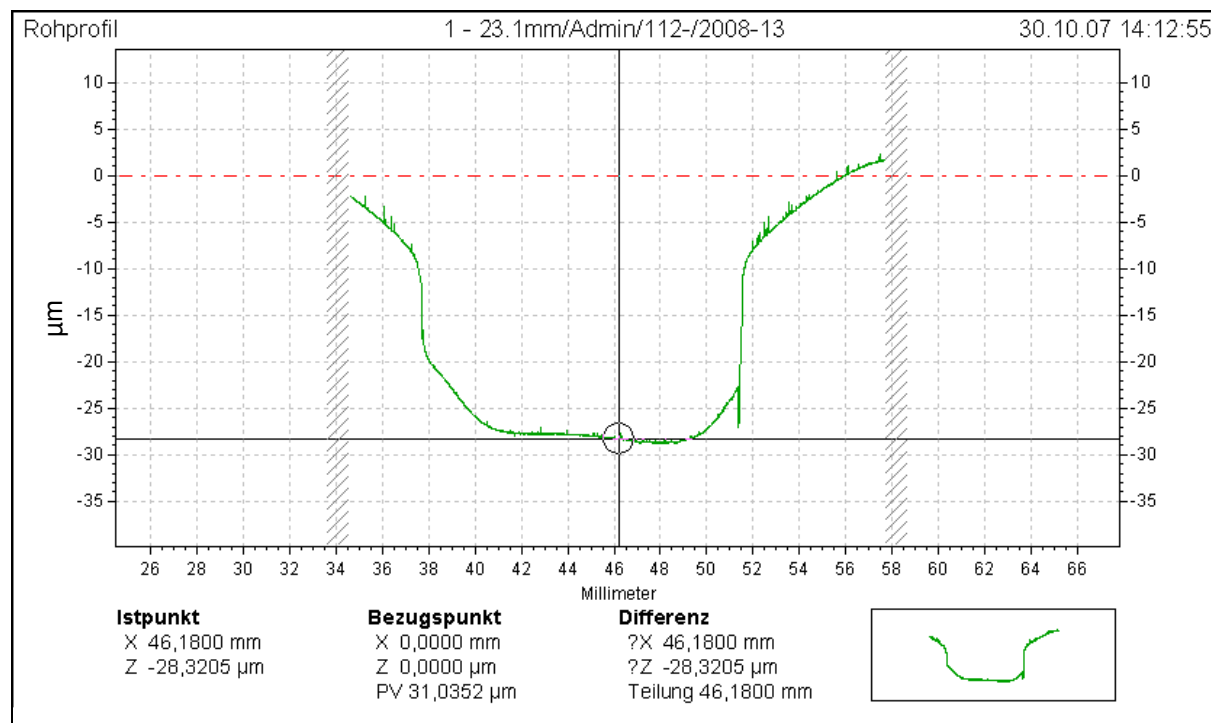


Abb. 70: Eindruck-Profil der Sensorscheibe

Unter dem Mikroskop wird dieser Umstand noch viel deutlicher. Durch das Eindringen des Substrates entstehen mechanische Spannungen, die sich auch auf das Sensorschichtsystem übertragen. Es kommt hier bereits zu ersten Abplatzungen (Abb. 71).

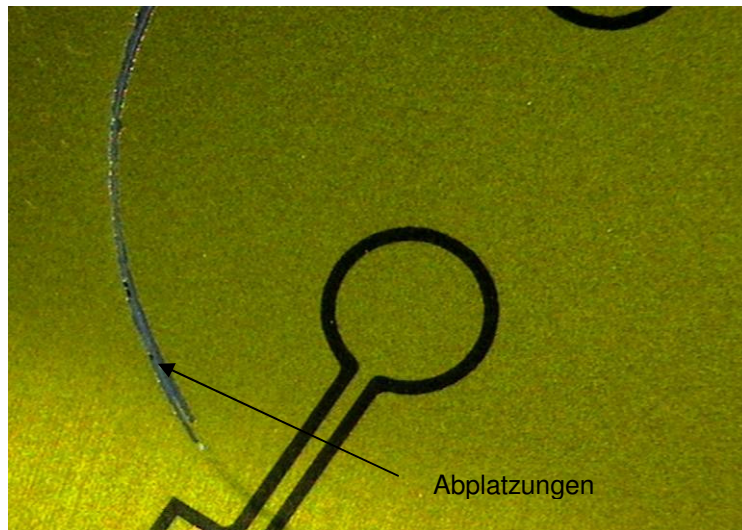


Abb. 71: Abplatzung der Sensorschicht

Für die erfolgreiche Weiterführung der Langzeitversuche müssen neue Materialien für die Sensorscheiben gewählt werden. Der Einsatz von Werkzeugstählen als Substratwerkstoff für Sensor- und Gegenscheiben hat sich in Schneidversuchen als geeignet herausgestellt.

Es sind 2000 Schnitte an einem TRIP 800 mit einer Blechdicke von 2 mm durchgeführt worden. Dabei kamen eine unbeschichtete Sensorscheibe aus X155CrVMo12-1 (1.2379) und eine unbeschichtete Gegenscheibe aus 115CrV3 (1.2210) mit einer jeweiligen Härte von 54 HRC zum Einsatz. Mithilfe des Profil- und Rauheitsmessgerätes T8000 sind die Scheiben auf eine eventuelle Profiländerung und Verformung hin untersucht worden. Die Messung erfolgte in einem 45° Winkel zur Schleifrichtung, um Messunregelmäßigkeiten durch den Einfluss der Oberflächenrauheit auszuschließen. Eine Auswertung der Profilmessergebnisse ergab nur eine minimale Verformung des Substratmaterials mit einem Abstand von zirka 0,018 mm zur Ebene (Abb. 72). Die Versuche lassen die Aussage zu, dass die verwendeten Scheibenwerkstoffe und –härten für eine Versuchsfortsetzung geeignet sind.

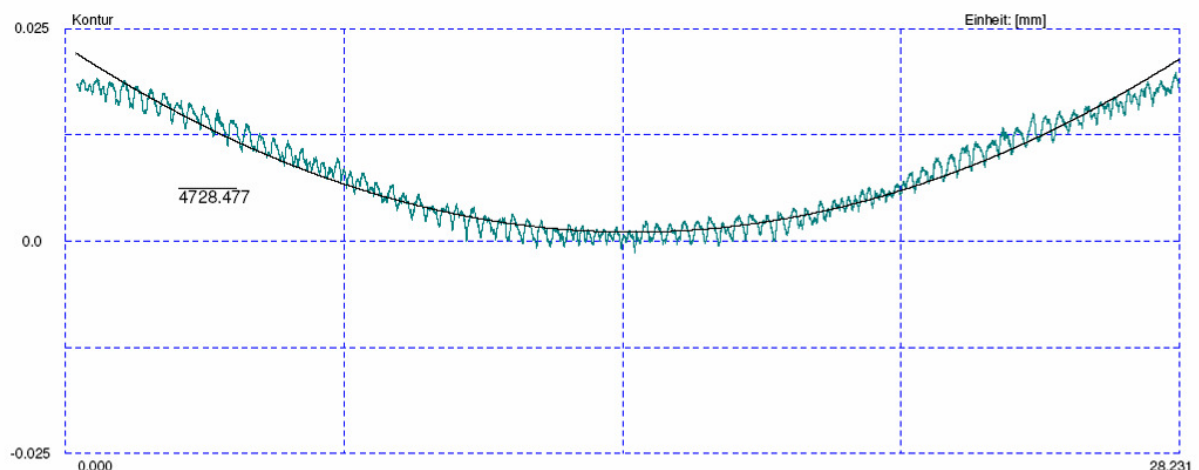


Abb. 72: Profil der Sensorscheibe nach 2000 Schnitten

Drittens war ersichtlich, dass konzeptionell der mechanische Aufbau der Sensorkomponenten gegenüber den verwendeten Sensormodulen für den Einsatz in der Praxis robuster auszulegen ist, in der Funktion weiter optimiert und den Gegebenheiten im Werkzeug angepasst werden muss.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass die Aufbau- und Verbindungstechnik zur Ableitung der elektrischen Signale der Sensorschichten von elementarer Bedeutung ist. Hier konnten in dem vorgegebenen Bearbeitungszeitraum nur ansatzweise Lösungen evaluiert werden und insofern wurde das angestrebte Projektziel nicht vollständig erreicht. Auf der Sensorschicht befinden sich elektrisch leitende Elektroden, die mit der Elektronik verbunden sind. Die Zuverlässigkeit dieser Verbindung ist mit entscheidend für die zu erreichende Standzeit der Sensorik.

Um als Standard-Baugruppe in der Konstruktion von Schneidwerkzeugen berücksichtigt werden zu können, ist es entscheidend, wie anwenderfreundlich, qualitativ sicher und effizient eine Integration solcher Sensoren im Werkzeug durchgeführt werden kann.

Vor dem Hintergrund der erzielten Ergebnisse sind sich alle Forschungspartner einig, dass die Distanz zur Zielerreichung in einem überschaubarem Rahmen liegt, der jedoch in den zeitlichen und finanziellen Grenzen des bestehenden Projektes nicht mehr erfüllt werden kann.

Die Motivation der Projektpartner, aber auch der Optimismus, die Zielsetzung in einem zeitlich kürzer angelegtem Folgeprojekt zu erreichen, basiert darauf, die erkannten Schwächen und Nachteile der realisierten Lösungen zu beseitigen. Deshalb beabsichtigen die Projektpartner, sich auf vier Schwerpunktthemen zu konzentrieren:

1. Konstruktion einer praxistauglichen mechanischen Ausprägung der Sensorkomponente
2. Stabilisierung und Optimierung der elektrischen Aufbau- und Verbindungstechnik
3. Entwicklung von belastbaren Analysestrategien in der Messdateninterpretation
4. Konstruktion und Entwicklung von Vorgaben zur effizienten Integration der Sensorik

Die Forschungspartner haben sich zum Ziel gesetzt, so kurzfristig wie nur möglich die Optimierungsmaßnahmen umzusetzen.

Das Forschungsvorhaben 203 ZBG der Forschungsvereinigung Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e.V. wurde im Programm zur Förderung der 'Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)' vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über die AiF finanziert.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Problemfelder beim Scherschneiden	2
Abb. 2 Veränderungen im Schneidkraftverlauf nach 30 000 Schnitten in TRIP 700 durch Schneidspaltverengung; Stempel aus 1.2363 TiC-TiN-beschichtet.....	3
Abb. 6: Ausführungsvarianten der Kraftsensoren.....	5
Abb. 7: Schematischer Aufbau des geschlossenen Systems	9
Abb. 8: Realisierung Sensoraufbau geschlossenes System.....	9
Abb. 9: Schematischer Aufbau des offenen Systems.....	10
Abb. 10: Realisierung Sensoraufbau offenes System	11
Abb. 11: Konstruktionszeichnung Sensor- Flex-Board, Version 2.....	11
Abb. 12: Sensor, offenes System mit Flex-Board verbinden.....	12
Abb. 13: Stromlaufplan der Verstärkerschaltung	13
Abb. 14: Sensorverstärker Top- Layer.....	13
Abb. 15: Kniehebelmessplätze	14
Abb. 16: Temperatureinfluss auf die DiaForce®-Schicht und das Chrom-Mäander.....	15

Abb. 17: Sensorkennlinien.....	16
Abb. 18: Kennlinien für Sensoren mit Gehäuse.....	17
Abb. 19: links - Modell des Versuchswerkzeuges; rechts - Sensoraufbau	18
Abb. 20: Schneidwerkzeug, eingebaut in die Exzenterpresse PEEV 25.2	18
Abb. 21: Abmessung der Schneidstempel.....	19
Abb. 22: Umkonstruktion der Platten des Schneidwerkzeuges.....	19
Abb. 23: komplette Plattensysteme mit integrierter Sensortechnik	19
Abb. 24: Werkzeug mit Schneidstempel in der Prüfmaschine	20
Abb. 25: Werkzeug im eingebauten Zustand an der hydraulischen Presse.....	21
Abb. 26: Kraftverläufe für das Schneiden von Edelstahl 1.4301	21
Abb. 27: Kraftverläufe vom Beginn des Schneidprozesses bis zum Rückhub des Stempels.....	22
Abb. 28: Kraftverläufe bis zur Rückkehr des Stößels in OT	22
Abb. 29: Lochwerkzeug mit Stempel für Durchmesser 10 mm	23
Abb. 30: Konstruktionszeichnung des Sensorgehäuses.....	23
Abb. 31: Einzelteile des Aufbaus und komplett montierter Sensor	23
Abb. 32: Plattensystem des Schneidwerkzeuges mit eingehaustem Sensor	24
Abb. 33: Kraftmessung mit dem offenen Sensorsystem.....	25
Abb. 34: Kraftmessung mit dem geschlossenen Sensorsystem	25
Abb. 35: Konstruktionszeichnung des Sensor- Board Version 3.....	25
Abb. 36: Flex-Board der Version 3, hier noch ohne Ausstanzung der Gegenscheibe.....	26
Abb. 39: Hardware System-Gehäuse	30
Abb. 40: Verbindungsplan der einzelnen Schaltungsteile	31
Abb. 41: Stromlaufplan des Sensorverstärkers	32
Abb. 42: Stromlaufplan des Multifunktionsverstärkers.....	35
Abb. 43: Stromlaufplan der Referenzspannungserzeugung	36
Abb. 44: Hardware HSG-IMIT: Mess-System TMS 320.....	37
Abb. 45: Stromlaufplan der Prozessorschaltung.....	38
Abb. 46: Stromlaufplan der Interfaceschaltung.....	40
Abb. 47: Stromlaufplan des DSP-Power Board	42
Abb. 48: links: von MISESSche Vergleichsdehnung, rechts: Schädigung nach COCKROFT- LATHAM am Stempel mit Radius.....	43
Abb. 49: Schichtaufbau Sensorscheibe (offenes System).....	44
Abb. 50: Schichtaufbau Gegenscheibe (offenes System).....	44
Abb. 51: Schichtaufbau Sensorscheibe (geschlossenes System)	44
Abb. 52: Schichtaufbau Gegenscheibe (geschlossenes System).....	44
Abb. 53: Interfacestellen a, b und c	45
Abb. 54: Flex-Board 1 mit vier Elektroden Abb. 55: Flex- Board 1 aufgelegt auf Sensorstruktur	46
Abb. 56: Kontaktierung der Sensorpunkte mit Silberhaltigen Klebstoffen.....	47
Abb. 57: geöffneter Sensor mit elektromechanischen Kontakten	47
Abb. 58: Elektrode vor und nach versuchtem Lötprozess.....	48
Abb. 59: Aufbau des Dreifachwerkzeuges.....	49
Abb. 59: Dreifachwerkzeug mit verschiedenen Schneidstempeldurchmessern	49
Abb. 60: Stempelhalteplatte mit drei Lochstempeln, eingesetzte Sensoren, montiertes Werkzeugoberteil, Einbau in der Presse PEEV 25.2.....	50
Abb. 61: Einfachwerkzeug mit 10 mm Stempel	50
Abb. 62: Schneidversuche 1mm Alu, Schneidkraft ca. 16kN im Einfachwerkzeug	51
Abb. 63: 5000 Schneidversuche 1mm Alu, Schneidkraft ca. 16kN im Dreifachwerkzeug	52
Abb. 64: Flex-Board mit Metallkontakten	52
Abb. 65: Abrieb an den Kontaktpads	53
Abb. 66: Eindruck-Profil der Sensorscheibe	53
Abb. 67: Abplatzung der Sensorschicht.....	54
Abb. 68: Profil der Sensorscheibe nach 2000 Schnitten.....	54

4 Wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas für kleine und mittlere Unternehmen (kmU)

4.1 Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse

Die Anwendung der Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens ist in den Fachgebieten Werkzeugherstellung, Produktion, Verfahrenstechnik sowie Werkstoff/Materialien möglich. Die Möglichkeit der Online-Prozessüberwachung durch intelligente Schichten ist übergreifend für die Fertiger von Stanz- und Feinschneidteilen, die Pressen- und Werkzeugbauer, aber auch für die Werkzeugbeschichter von größter Bedeutung, besonders im Hinblick auf die Erzielung reproduzierbarer Teilequalitäten und die Stabilität der Schneidprozesse. Angesprochen sind somit Unternehmen aus den Wirtschaftszweigen: Metallbearbeitung, Maschinenbau, Elektrotechnik, Fahrzeug- und Anlagenbau.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens sind für die im Projektbegleitenden Ausschuss vertretenen Firmen von besonderem Interesse, stehen aber auch anderen Firmen zur Verfügung.

4.2 Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der kmU

Das geplante Forschungsvorhaben ist besonders für die sich mit diesem Themenkreis beschäftigenden Anwender der kleinen und mittelständischen Industrie von großer Bedeutung. Als Zulieferer z.B. für die Automobilindustrie stehen sie häufig unter einem großen Wettbewerbsdruck, besonders gegenüber Anbietern aus Niedriglohnländern. Für eine wirtschaftliche und qualitativ hochwertige Fertigung in der Scherschneidtechnik ist eine Online-Prozessüberwachung unumgänglich. Sie bildet die Grundlage für eine effektive Prozesssteuerung. Damit ist die Möglichkeit gegeben, direkt im Scherschneidprozess auf Veränderungen im Schneidspalt reagieren zu können und die Bauteilqualität zu beeinflussen sowie Werkzeugbruch zu vermeiden. Die dadurch erreichbare höhere Prozesssicherheit ist ein wichtiger Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit klein- und mittelständischer Unternehmen.

5 Beabsichtigte Umsetzung der angestrebten Forschungsergebnisse

Bei der Durchführung des Forschungsprojektes werden die zwei Forschungsstellen durch Beratungs- und Sachleistungen der Firmen des projektbegleitenden Ausschusses unterstützt. Dies zeigt das große Interesse der Industrie an der dargestellten Thematik. Der Ausschuss setzt sich aus Industrievertretern von zusammen, deren Tätigkeiten inhaltlich in einem engen Bezug zu dem Projekt stehen und die dementsprechend im Interesse einer schnellen Umsetzbarkeit der Forschungsergebnisse in besonderem Maße beratend zu dessen Ausgestaltung beitragen werden.

Der Projektbegleitende Ausschuss wird zum Projektauftritt und zu den Meilensteinen im Halbjahresabstand über den Stand des Vorhabens informiert und erhält Gelegenheit, auf den Fortgang Einfluss zu nehmen.

Das Arbeitsprogramm des beantragten Forschungsvorhabens wurde in Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss abgestimmt, damit eine Praxisrelevanz gewährleistet ist. Bei erfolgreichem Projektabschluss sollen die Untersuchungsergebnisse in den Konstruktions- und Fertigungsablauf der beteiligten Firmen einbezogen werden.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens werden im Fachausschuss „Prozesssicherheit und Produktqualität“ laufend beraten, in Transfer-Workshops der EFDS der Öffentlichkeit vorgestellt und in der Zeitschrift „Vakuum in Forschung und Praxis“ gemäß Vereinbarung der EFDS mit dem Verlag Wiley-VCH sowie weiteren Zeitschriften publiziert.

Der EFDS wird ein Poster für die Präsentation auf Workshops, Messen usw. und eine elektronische Vorlage für ein Informationsblatt zur Verfügung gestellt. Ein Abstrakt erscheint auf der Internet-Seite der EFDS.

Weitere Transfermaßnahmen werden mit dem Transferzentrum Oberflächen- und Schichttechnologien der Forschungsvereinigung EFDS e.V. abgesprochen.

6 Durchführende Forschungsstellen

Forschungsstelle 1: Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) Chemnitz
Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr.-Ing. E. h. Reimund Neugebauer (Institutsleiter)
Dr.-Ing. Verena Kräusel (Projektbearbeiterin)

Forschungsstelle 2: Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST) Braunschweig
Prof. Dr. rer. nat. Günter Bräuer (Institutsleiter)
Dipl.-Ing. Martin Weber (Projektbearbeiter)

Forschungsstelle 3: Hahn-Schickard-Gesellschaft Villingen-Schwenningen
Institut für Mikro- und Informationstechnik HSG-IMIT
Prof. Dr. Ing. Holger Reinecke (Institutsleiter)
Dipl.-Ing. (FH) Dieter Mintenbeck (Projektbearbeiter)