

# Lehrstuhl für Umformtechnik

Department Product Engineering,  
Montanuniversität Leoben



## **DIPLOMARBEIT**

EINSATZ DER HOCHTEMPERATUR-PHOTOGRAMMETRIE IN  
DER MESSUNG DER AKKUMULIERTEN LOKALEN  
VERFORMUNGEN UND DER RISSINITIIERUNG

**Thomas Wlanis**

Montanmaschinenwesen

Betreut von Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof Sommitsch

November 2008

### **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Leoben, November 2008

Thomas Wlanis

# Danksagung

Ich bedanke mich bei Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof Sommitsch für die Betreuung der Diplomarbeit. Weiters danke ich Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Bruno Buchmayr für die Möglichkeit die im Rahmen dieser Arbeit notwendigen Versuche an der Servotest und der Hydraulikpresse des Lehrstuhls für Umformtechnik durchzuführen und Dr. Stockinger von der Böhler Schmiedetechnik GmbH & Co KG für das Nickelbasisprobenmaterial. Mein Dank gilt auch den Mitarbeitern und Kollegen des Lehrstuhl für Umformtechnik und des CD-Labors für Werkstoffmodellierung und Simulation für Diskussion und Hilfe bei der Durchführung der Versuche und der Anfertigung dieser Diplomarbeit.

# Kurzfassung

Bei Prozessen der Warmumformung kommt es immer wieder zu unerwünschten Rissbildungen oder Verformungslokalisierungen. Um dagegen wirken zu können ist eine genaue Analyse des Prozesses erforderlich. Ein Weg hierzu ist die experimentelle Ermittlung von lokalen Dehnungen und Verschiebungen sowie der Rissbildung welche z.B. mit einer Finiten-Elemente Berechnung verglichen werden können, unter Einsatz von entsprechenden Schädigungsmodellen. Die Schwierigkeit besteht in der Prozessanalyse und der Parameterbestimmung für die Modelle. Eine Möglichkeit des entsprechenden Abgleichs zwischen Modell und Experiment bietet die Photogrammetrie. Der Einsatz bei Raumtemperatur wurde in der Literatur schon mehrfach beschrieben, ob die Methode auch bei hohen Temperaturen einsetzbar ist, sollte in dieser Arbeit überprüft werden.

Um die Einsetzbarkeit der Photogrammetrie in der Warmumformung bewerten zu können wurden Versuche mit Nickelbasis und Aluminium Proben durchgeführt. Als photogrammetrisches System kam das Aramis System der Firma Gom zum Einsatz. Die Stauchversuche wurden auf der Servotest sowie auf der 1MN Hydraulikpresse des Lehrstuhls für Umformtechnik durchgeführt. Um die von den zwei Kameras aufzunehmenden Bilder berechnen zu können müssen die zu untersuchenden Proben mit einem Muster versehen werden. Die notwendigen Muster wurden mit unterschiedlichen Methoden aufgebracht.

Die von den beiden Kameras aufgenommenen Bilder werden mit der Aramissoftware ausgewertet, dabei können Werte für die Hauptformänderung, Nebenformänderung, Dehnung nach Mises oder Tresca, Verschiebungen, richtungsabhängige Dehnungen und Verschiebungen sowie weitere Daten berechnet werden. Dabei können auch Erkenntnisse über das Verformungsverhalten, der Stempelführung, etc. im Zuge der Umformung gewonnen werden.

Die Versuche und auch die Auswertungen haben gezeigt, dass ein photogrammetrisches System für die Zwecke der Dehnungslokalisierung und Rissbildung eingesetzt werden kann. Dabei wurden die Schwierigkeiten, Grenzen und Möglichkeiten aufgezeigt und mögliche Lösungen und Verbesserungen erarbeitet. Es zeigte sich, dass die Qualität des aufgebrachten Musters von entscheidender Bedeutung für die Anwendung ist. Um die Rissbildung betrachten zu können, müssen Risse im auswertbaren Bereich auftreten. Vieles beeinflusst sich gegenseitig (z.B. Aufnahmefrequenz und Belichtungszeit), sodass hierfür weiterführende Arbeiten erforderlich sind.

# Abstract

In hot forming processes undesirable cracks and strain localization can appear, which demands a proper analysis of the process, e.g. by a finite element analysis coupled with damage models. For these models parameters have to be determined and the forming process has to be analysed. A possibility for comparing the simulation with the real process is the use of a photogrammetry system. The implementation of such a system is described in the literature at room temperature in detail, however, its applicability for the hot forming process was investigated in this thesis.

For the evaluation of the usability of the photogrammetric system Aramis for hot forming experiments, nickel-based alloys and aluminium alloys have been tested. The compression tests were performed on a Servotest and the 1MN hydraulic press of the Chair of Metal Forming. For the interpretation of the images the specimens had to be prepared with a muster. There are different methods to get such a muster.

The images were analysed by the Aramis software to get values for Mises strain, Tresca strain, displacement, major strain and minor strain and other values. Additionally, information about deformation characteristic and tool movement during the forming were gathered.

Experiments showed that a photogrammetric system can be used for measuring strain localisation and crack initiation. During that evaluation some important aspects were discussed. An important factor was the quality of the muster. For the crack analyses they have to appear in an evaluable area of the specimen. Many factors like image rate, exposure time, etc. depend on each other, which need additional investigations in future.

# Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	I
Danksagung	II
Kurzfassung	III
Abstract	IV
Inhaltsverzeichnis	V
<b>1 Grundlagen</b>	<b>1</b>
1.1 Photogrammetrie	1
1.1.1 Stereoskopie	1
1.1.2 Stereosehen	1
1.2 ARAMIS-System	2
1.2.1 Merkmale des ARAMIS - Systems	3
1.2.2 Prinzip der Verformungs- und Dehnungsmessung	4
1.3 Bisherige Dehnungs- und Rissmessung bei der Kaltumformung	13
1.3.1 Spaltzugversuch an Verbundkörpern	13
1.3.2 Einsatz von ARAMIS in der Bruchmechanik	14
1.3.3 Bestimmung von Formänderungsdiagrammen	15
1.4 Einflussfaktoren	19
1.4.1 Abstand der Kameras vom betrachteten Objekt	19
1.4.2 Abstand der Kameras zueinander	19
1.4.3 Blende	19
1.4.4 Belichtungszeit	20
1.4.5 Aufnahmefrequenz	20
1.4.6 Lichtquelle	20
1.4.7 Umformgeschwindigkeit	20
1.4.8 Oberfläche	21
1.4.9 Muster	21

1.4.10	Probenform . . . . .	21
1.4.11	Anmerkung zu den Einflussfaktoren . . . . .	21
<b>2</b>	<b>Experimentelles . . . . .</b>	<b>23</b>
2.1	Die Nickelbasislegierung Udimet 720 . . . . .	23
2.2	Die Aluminiumlegierung AA6082 . . . . .	25
2.2.1	Metallographische Auswertung . . . . .	25
2.3	Versuchsaufbau . . . . .	28
2.4	Einflüsse auf den Versuchsablauf . . . . .	30
2.4.1	Aufheizen der Probe mit Induktor . . . . .	30
2.4.2	Hubtisch . . . . .	32
2.4.3	Versuche ohne Schmierstoff . . . . .	33
2.5	Präparation der Versuchsproben . . . . .	34
2.5.1	Aufspritzen eines Punktemusters . . . . .	34
2.5.2	Erstellen eines regelmäßigen Musters mit einer Airbrush . . . . .	35
2.5.3	Erstellen eines stochastischen Musters mit einer Airbrush . . . . .	36
<b>3</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion . . . . .</b>	<b>38</b>
3.1	Versuche mit Udimet 720 . . . . .	38
3.2	Versuche mit AA6082 . . . . .	51
3.2.1	Versuche mit regelmäßigem Muster . . . . .	52
3.2.2	Versuche mit stochastischem Muster . . . . .	63
<b>4</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick . . . . .</b>	<b>76</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis . . . . .</b>	<b>79</b>
	<b>Tabellenverzeichnis . . . . .</b>	<b>83</b>
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>84</b>

# 1 Grundlagen

## 1.1 Photogrammetrie

Photogrammetrie ist die Aufnahme und Auswertung von Messbildern zur Bestimmung der Beschaffenheit, Form und Lage beliebiger Objekte. Sie wird eingesetzt bei [1]:

- Architektur- und Kunstwerkvermessung
- Ballistik
- Forstbereich
- Röntgenologie
- Polizeiwesen
- technisches Versuchswesen
- Ingenieurbau

In der vorliegenden Diplomarbeit wird die Nahbereichsphotogrammetrie, die eine Stereoauswertung von digitalen Bildpaaren ermöglicht, angewendet.

### 1.1.1 Stereoskopie

Darunter versteht man die räumliche Rekonstruktion einer dreidimensionalen Szene, die mit Kameras mit definierter Ausrichtung aufgenommen wurde. Damit ist es möglich, Körper dreidimensional zu vermessen.

### 1.1.2 Stereosehen

Mit Hilfe zweier Kameras ist das Stereosehen, welches dem menschlichen sehen entspricht, möglich. Die dreidimensionale Szene wird zweidimensional abgebildet und ermöglicht, so wie beim Auge des Menschen, Entfernungen abzuschätzen.

## 1.2 ARAMIS-System

ARAMIS ist ein berührungslos arbeitendes, optisches 3D-Verformungsmesssystem. ARAMIS analysiert, berechnet und dokumentiert Materialverformungen, die grafischen Darstellungen der Messresultate vermitteln ein optimales Verständnis des Messprobenverhaltens [2].

ARAMIS erkennt in digitalen Kamerabildern die Oberflächenstruktur der Messprobe und ordnet Bildpixeln Koordinaten zu. Die ersten Koordinaten entstehen bereits bei der Aufnahme des Referenzzustandes. Diese Aufnahme stellt im Messprojekt den unverformten Zustand dar. Nach oder während der Verformung der Messprobe erfolgen weitere Aufnahmen. ARAMIS vergleicht nun die digitalen Aufnahmen und berechnet die Verschiebung und Verformung der Objektmerkmale.

Weist die Messprobe nur wenige Objektmerkmale auf, z.B. bei homogenen Oberflächen, dann ist die Oberfläche mit geeigneten Methoden vorzubehandeln, z.B. mit dem Aufbringen eines stochastischen Farbsprühmusters. ARAMIS eignet sich besonders zur dreidimensionalen Verformungsmessung, unter statischer oder dynamischer Last, um Verformungen und Dehnungen flächenhaft an realen Bauteilen zu analysieren.

Die überwiegende Anzahl der Systemfunktionen sind per Software gesteuert. Es stehen Mess-, Auswerte-, Darstellungs- und Druckfunktionen zur Verfügung. Alle Funktionsaufrufe sind über Pull-Down-Menüs, Hotkeys, Makrobefehle und Dialogfenster realisiert.

Anwendungsgebiete:

- Materialprüfung [3] [4] [5] [6]
- Festigkeitsbeurteilung [7] [8] [9] [10]
- Bauteildimensionierung
- Untersuchung nicht-linearen Verhaltens
- Charakterisierung von Kriech- und Alterungsprozessen
- Bestimmung von Grenzformänderungskurven (FLC Forming Limit Curve)[11]
- Verifikation von FE-Modellen
- Ermittlung von Materialkennwerten
- Analyse des Verformungsverhaltens von homogenen und inhomogenen Werkstoffen
- Dehnungsberechnung [12][13][14]

### 1.2.1 Merkmale des ARAMIS - Systems

- Verwendung als 2D- oder 3D-Messsystem
- ARAMIS ordnet quadratische oder rechteckige Bildausschnitte, so genannte Facetten (z.B. 15x15 Pixel) in unterschiedlichen Bildern einander zu
- Unterschiedliche Lichtverhältnisse bei den verschiedenen Aufnahmen werden automatisch kompensiert
- Einfache Probenpräparation, da für das angewandte Rasterverfahren nur das Aufbringen eines stochastischen oder regelmäßigen Musters nötig ist, falls die Probenoberfläche keine ausreichende Strukturierung aufweist
- Großer Messbereich: sowohl kleine als auch große Objekte (von 1 mm bis zu 2000 mm) können mit dem gleichen Sensor vermessen werden. die Verformungen können sich dabei in einem Bereich von 0,05% bis zu mehreren 100% bewegen
- Flächenhafte und grafische Darstellung der Messergebnisse im dreidimensionalen Ergebnisraum mit hoher Messpunktdichte
- Die grafische Darstellung der Messresultate ermöglicht ein optimales Verständnis des Bauteilverhaltens
- Hohe Mobilität, da sich das System mit den mitgelieferten Transportkoffern einfach unterbringen lässt und problemlos per PWK oder Flugzeug transportiert werden kann
- Transformationen
- Reportgenerierung und Exportfunktion für Messdaten und Ergebnisdaten

#### Wesentlichen Bestandteile des Systems

- Sensor mit zwei Kameras (bei 3D-Aufbau)
- Stativ
- Triggerbox für die Stromversorgung der Kameras und Steuerung der Bildauflösung
- Hochleistungs PC-System
- ARAMIS-Anwendersoftware und Linux-Systemsoftware

Das für diese Arbeit verwendete System besitzt folgende Merkmale:

#### ARAMIS System 2M HS:

- zwei hochauflösende digitale CCD Kameras (1280x1024, 8bit, externer Trigger)
- Bildrate 500Hz im Vollbild bis 8000Hz bei 1280x64 Pixel
- Profil 500mm, zwei Schwenkköpfe zur Befestigung und Einstellung der Kameras
- zwei Schneider Kreuznach Objektive Brennweite 50mm mit Zwischenringen

- Transportbox für Aufnahmesystem
- ARAMIS (Auswertesoftware nach dem 3D-Rasterverfahren)
- Stativ

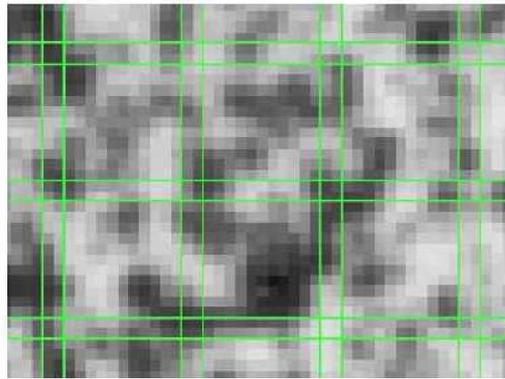
3D-Bildverarbeitungsrechner (64-Bit):

- 19"-Industriegehäuse
- 64-Bit-Doppelprozessor System mit 2x AMD Opteron 2,4 GHz
- 8 GByte Hauptspeicher
- 2x 300 GByte Festplatte (RAID-System)
- High-End OpenGL-Grafikkarte
- 64-Bit Bildverarbeitungskarte mit 19"-Konverterbox
- GOM-Linux
- Transportkoffer mit Rollen
- 19"-TFT-Monitor mit Transportkoffer

### 1.2.2 Prinzip der Verformungs- und Dehnungsmessung

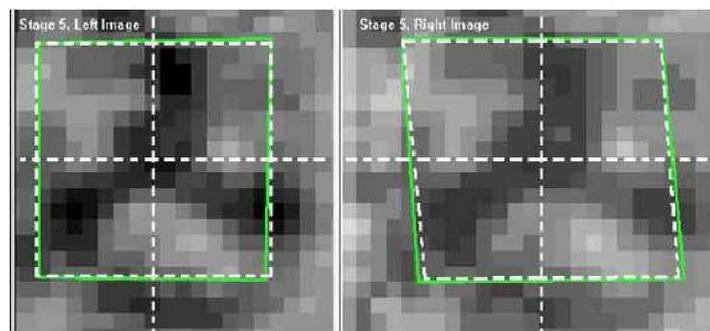
In dieser Arbeit wird die 3D Vermessung von Stauchproben bei der Warmumformung beschrieben, zu diesem Zweck kamen zwei Kameras (Stereoaufbau) zum Einsatz, die vor der Messung kalibriert wurden. Die Messprobe muss sich für eine gültige Messung innerhalb eines resultierenden Messvolumens (kalibrierter 3D-Raum) befinden. Bei jedem neuen Messprojekt erfolgen in der Software die Bildaufnahmen (monochrom, Kamera rechts, Kamera links) in den verschiedenen Laststufen der Probe. Nach den Aufnahmen erfolgt die Definition des auszuwertenden Bereiches (Berechnungsmaske) und das Anlegen eines Startpunktes. Wenn dies geschehen ist, kann das Projekt berechnet werden.

Aramis beobachtet die Verformung der Messprobe in den Bildern über eine Vielzahl von quadratischen oder rechteckigen Bildausschnitten (Facetten) (Abb. 1.1). Die Facetten werden in den verschiedenen Laststufen über die individuellen Grauwertstrukturen erkannt und verfolgt [2].



**Abbildung 1.1:** 15x15-Facetten mit 2 Pixel Überlappung [2]

Die Abb. 1.2 zeigt den verformten und unverformten Zustand einer Facette. Mit Hilfe der Eckpunkte der grünen Facette wird der resultierende Mittelpunkt in 2D-Koordinaten bestimmt. Mit den 2D-Koordinaten beobachtet von der linken Kamera und die 2D-Koordinaten der gleichen Facette beobachtet von der rechten Kamera, kann über photogrammetrische Methoden eine gemeinsame 3D-Koordinate berechnet werden. Weiters können in einem Post-Processing z.B. Messrauschen und lokale Störeffekte ausgeblendet werden. Aus den so ermittelten Verschiebungen kann eine Dehnungsberechnung erfolgen.



**Abbildung 1.2:** Verschiebung der Facette, unverformt weiße Linie, verformter Zustand grüne Linie [2]

In der optischen Messtechnik werden die Koordinaten, Verschiebungen und Dehnungen nur auf der Oberfläche von Objekten bestimmt. Damit ist die Berechnung auf lokale Dehnungen begrenzt, die tangential zur Oberfläche verlaufen.

Ein Maß für die Deformation eines Linienelementes kann wie folgt definiert werden:

$$\lambda = \lim_{l \rightarrow 0} \left( \frac{l + \Delta l}{l} \right) \quad (1.1)$$

Das Streckungsverhältnis  $\lambda$  ist also die relative Längenänderung eines infinitesimalen Linienelementes. Ein Dehnungsmaß  $\varepsilon$  kann als Funktion des Streckungsverhältnisses  $\lambda$  definiert werden

Die folgenden Funktionen geben die häufig verwendeten Dehnungsmaße wieder:

Technische Dehnung:

$$\varepsilon^T = f(\lambda) = \lambda - 1 \quad (1.2)$$

Logarithmische oder wahre Dehnung:

$$\varepsilon^L = \varphi = f(\lambda) = \ln(\lambda) \quad (1.3)$$

Greensche Dehnung:

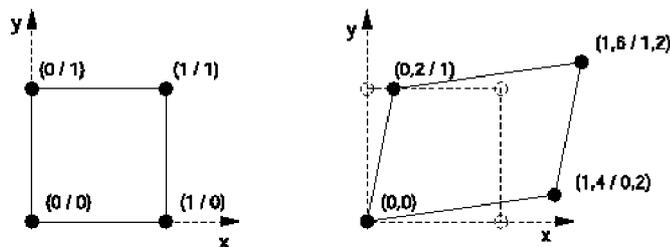
$$\varepsilon^G = f(\lambda) = \frac{1}{2}(\lambda^2 - 1) \quad (1.4)$$

### 1.2.2.1 Definition der x-y Dehnungswerte in 2D

Die Werte  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  und  $\varepsilon_{xy}$  können direkt aus dem symmetrischen Streckungstensor  $\mathbf{U}$  über folgende Formel abgelesen werden:

$$U = \begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} \\ U_{21} & U_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xy} & 1 + \varepsilon_y \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

Die Abb. 1.3 gibt ein Beispiel wieder:



**Abbildung 1.3:** Verformung eines Einheitsquadrates, links unverformt, rechts verformt [2]

$$U = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & u_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,4 & 0,2 \\ 0,2 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

Der Scherwinkel  $\gamma_{xy}$  dient zur geometrischen Interpretation der Werte  $\varepsilon_{xy}$ . Der Scherwinkel beschreibt die Änderung eines  $90^\circ$  Winkels im unverformten Zustand zu einem neuen Winkel im deformierten Zustand.

Bei großen Dehnungswerten darf  $\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy}$  nicht angenommen werden!

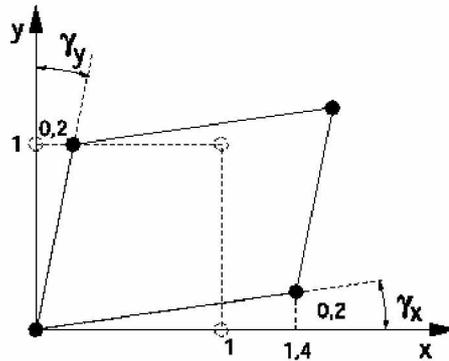


Abbildung 1.4: Definition Scherwinkel [2]

Mit Hilfe der Beispieldaten läßt sich die Definition des Scherwinkels (Abb. 1.4) wie folgt ableiten:

$$\gamma_{xy} = \gamma_x + \gamma_y \quad (1.7)$$

$$\gamma_x = \arctan(\varepsilon_{xy}/(1 + \varepsilon_x)) = \arctan(0,2/(1,4)) \quad (1.8)$$

$$\gamma_y = \arctan(\varepsilon_{xy}/(1 + \varepsilon_y)) = \arctan(0,2/(1)) \quad (1.9)$$

### 1.2.2.2 Definition von 2D-Koordinatensystem und Dehnungsrichtungen

$$\mathbf{P}_{v,i} = \mathbf{u}_i + \mathbf{F} * \mathbf{P}_{u,i} \quad (1.10)$$

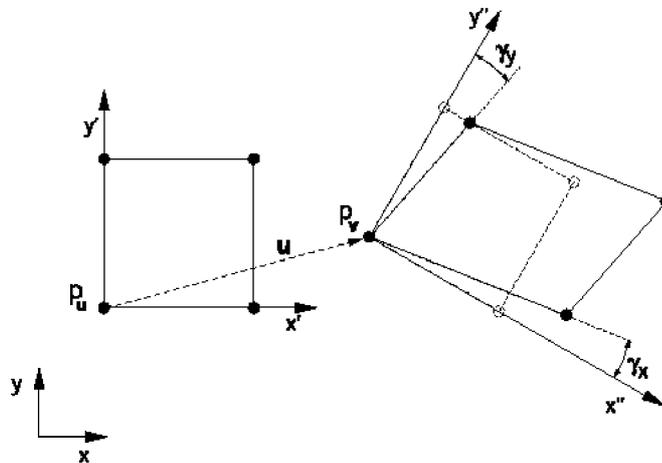
$\mathbf{P}_{v,i}$  ....Koordinaten des verformten Punktes

$\mathbf{P}_{u,i}$  ....Koordinaten des unverformten Punktes

$\mathbf{u}_i$  .....Starrkörpertranslation

$\mathbf{F}$ .....Deformationsgradiententensor

Der Deformationsgradiententensor  $\mathbf{F}=\mathbf{R}\mathbf{U}$  lässt sich in die Rotationsmatrix  $\mathbf{R}$  und den Streckungstensor  $\mathbf{U}$  aufteilen (Abb. 1.5).



**Abbildung 1.5:** Definition des Koordinatensystems (basierend auf der Deformation eines Einheitsquadrats) [2]

$x$ - $x$ .....globales Koordinatensystem

$x'$ - $y'$ .....lokales unverformtes Koordinatensystem

$x''$ - $y''$ ...lokales verformtes Koordinatensystem

Die Koordinaten des Punktes (z. B.  $p_u$  und  $p_v$ ) werden im globalen  $x$ - $y$ -Koordinatensystem berechnet. Für die 2D-Betrachtung ist das Koordinatensystem  $x'$ - $y'$  parallel zu  $x$ - $y$ , befindet sich aber in der Position des unverformten Punktes  $\mathbf{P}_{u,i}$ . Die Rotationsmatrix  $\mathbf{R}$  definiert die Drehung des  $x'$ - $y'$ -Systems im Vergleich zum  $x''$ - $y''$ -System. Das Koordinatensystem  $x''$ - $y''$  für die Dehnungsberechnung ist unabhängig von der Starrkörperbewegung und der Rotation. Es zeigt die Verformung durch den Streckungstensor  $\mathbf{U}$  und definiert die Richtung der Dehnungswerte ähnlich wie in Abb. 1.4 dargestellt. Das führt zu:

$X''$  Richtung == Richtung der Dehnung  $x$

$Y''$  Richtung == Richtung der Dehnung  $y$

### 1.2.2.3 Haupt- und Nebenformdehnungen abgeleitet aus dem Deformationsgradiententensor

Ein Nachteil der Dehnungsmaße  $\varepsilon_x$  und  $\varepsilon_y$  ist, dass sie abhängig vom Koordinatensystem definiert wurden. Eine Möglichkeit diesen Nachteil zu eliminieren ist die Berechnung

der Haupt- und Nebenformdehnung. Dazu wird die symmetrische Matrix  $\mathbf{U}$  auf Hauptdiagonalenform transformiert. Die beiden Eigenwerte  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  können folgendermaßen berechnet werden:

$$\lambda_{1,2} = 1 + \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2}\right)^2 - (\varepsilon_x * \varepsilon_y - \varepsilon_{xy}^2)} \quad (1.11)$$

Die Streckungsverhältnisse  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  können je nach Wahl des Dehnungsmaßes in entsprechende Dehnungswerte umgewandelt werden. Der größere Eigenwert wird Hauptdehnung bzw. Hauptformänderung ( $\varepsilon_1$  oder  $\varphi_1$ ) (auch als "Major strain" bezeichnet) und der kleinere Eigenwert Nebendehnung bzw. Nebenformänderung ( $\varepsilon_2$  oder  $\varphi_2$ ) (auch als "Minor strain" bezeichnet) genannt. Die dazugehörigen Eigenvektoren bestimmen die beiden Richtungen von Haupt- und Nebenformänderung. Die so ermittelten Dehnungswerte sind koordinatensystemunabhängig und somit universell verwendbar.

Aufgrund der Volumenkonstanz ergibt sich:

$$\lambda_1 * \lambda_2 * \lambda_3 = 1 \quad (1.12)$$

Sehr gerne werden Vergleichsumformgrade verwendet. Hierfür gibt es Definitionen nach Tresca und nach von Mises. Nach von Mises ist der Vergleichsumformgrad wie folgt definiert:

$$\varphi_v = \sqrt{\frac{2}{3}(\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_3^2)} \quad (1.13)$$

In diese Formel geht auch  $\varphi_3$  ein, das bedeutet der Vergleichsumformgrad ist nur gültig, wenn die Volumenkonstanz gilt.

Der Vergleichsumformgrad nach Tresca ist mit folgender Formel beschrieben:

$$\varphi_v = |\varphi|_{max} \quad (1.14)$$

#### 1.2.2.4 Definition der x-y-Dehnungswerte und der Dehnungsrichtungen in 3D

Bisher wurde die Berechnung der Dehnung im 2D-Raum beschrieben. Im Allgemeinen bestehen die Messdaten aus 3D-Punkten der Probenoberfläche. Um nun die oben definierten 2D-Berechnungsmodelle nutzen zu können, ist eine erweiterte Definition der lokalen Richtungen nötig. Die lokalen Dehnungskoordinatensysteme müssen tangential zur lokalen

Oberfläche sein, und zur Dehnungsberechnung müssen die 3D-Daten in den 2D-Raum transformiert werden.

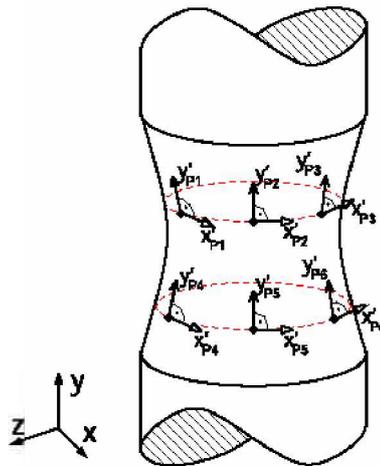
Abb. 1.6 zeigt die Definition der lokalen Dehnungsrichtungen. Das globale Koordinatensystem  $x$ - $y$ - $z$  kann im Allgemeinen nicht für die lokalen Dehnungswerte verwendet werden. Das  $x$ - $y$ - $z$ -Koordinatensystem ist im Allgemeinen nicht parallel zu den lokalen tangentialen Richtungen. Für die lokale Dehnungsberechnung in ARAMIS wird ein  $x'$ - $y'$ -Koordinatensystem für den unverformten Zustand wie folgt definiert:

Für jeden Punkt (z.B. Punkt  $P_1$  in Abb. 1.7) ist die lokale Dehnungsrichtung  $x'$ :

- tangential zur Oberfläche des lokalen Punktes
- parallel zur  $x$ - $z$ -Ebene

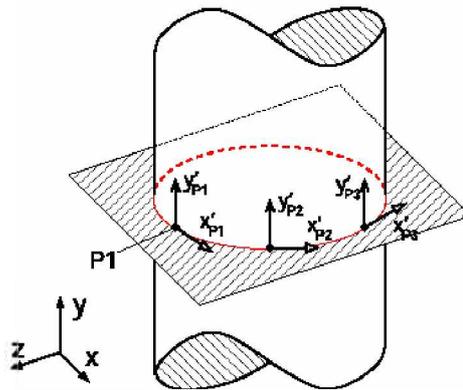
die lokale Dehnungsrichtung  $y'$ :

- tangential zur Oberfläche des lokalen Punktes
- senkrecht zu dem lokalen  $x'$



**Abbildung 1.6:** Definition des verformten lokalen Koordinatensystems für die Oberflächendehnung im 3D-Raum [2]

Abb. 1.7 zeigt das lokale Koordinatensystem einer Zylinderprobe für drei verschiedene Punkte. In diesem speziellen Fall sind die  $y'$ -Richtungen aller Oberflächenpunkte parallel zur globalen Richtung.



**Abbildung 1.7:** Definition des unverformten lokalen Koordinatensystems für die Oberflächendehnung im 3D-Raum basierend auf einer Ebene parallel zu x-z [2]

Beide Richtungen ( $x'$  und  $y'$ ) sind im Allgemeinen nicht parallel zum globalen Koordinatensystem gerichtet. Dieser Sachverhalt ist in Abb. 1.6 dargestellt. Die gestrichelten Ellipsen sind parallel zur x-z-Ebene und die unterschiedlichen lokalen  $y'$ -Richtungen sind tangential zur Oberfläche.

Parallel zur Definition der Richtungen müssen die 3D-Daten in den 2D-Raum transformiert werden. Dafür können zwei Modelle verwendet werden. Diese Modelle basieren auf Ebenen oder Splines.

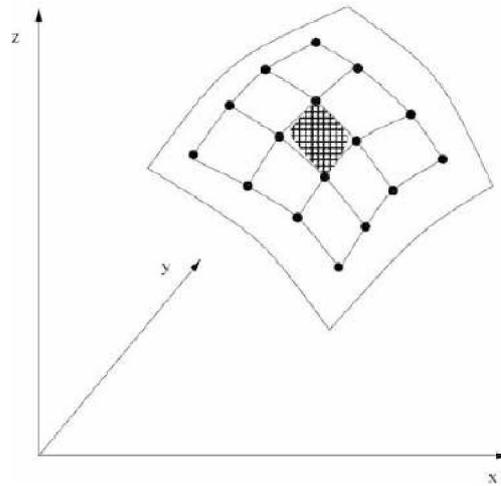
### Das Ebenenmodell:

Das erste Modell geht davon aus, dass die lokale Umgebung eines Punktes sehr gut durch eine Tangentialebene angenähert werden kann. Aufgrund der beliebigen Verformung der Oberfläche muss die Berechnung der Tangentialebene für den verformten und für den unverformten Fall getrennt erfolgen. Die Punkte der lokalen Umgebung werden danach in die Tangentialebene gelotet und man erhält für den verformten wie den unverformten Zustand zwei Punktemengen im zweidimensionalen Raum, in der die Dehnungsermittlung erfolgen kann. Es ergeben sich zusammengefasst die folgenden Teilaufgaben:

- Bestimmung der Tangentialebenen
- Transformation der 3D-Punktumgebungen in die Tangentialebenen
- Koordinatentransformation der Tangentialebene in den 2D-Raum (Koordinatensysteme  $x'$ - $y'$  und  $x''$ - $y''$ )
- Berechnung des Deformationsgradiententensors aus den 2D-Punktemengen

### Das Splinemodell:

Das vorgestellte Tangentialmodell liefert gute Resultate, sofern die Annahme der Linearisierung für eine lokale Punktumgebung zutrifft. Im Bereich des Tiefziehens weisen die umgeformten Materialien zum Teil stark lokal gekrümmte Flächen auf. Das Problem besteht nun darin, die zu vermessenden Merkmale in einer solchen Frequenz auf das zu vermessende Objekt aufzubringen, dass die Annahme der lokalen Linearität weiterhin gegeben ist. Diese Eigenschaft lässt sich jedoch in der Realität selten herstellen. Aus diesem Grund ist es sinnvoller, andere Modelle zu benutzen, die die eigentliche Form der Oberfläche besser modellieren. Ein gutes Modell für stetig gekrümmte Kurven stellen Splines dar. Um die Seitenlängen nicht nur nach einem linearen Modell zu berechnen, benötigt man mehr Informationen als zwei Punkte auf einer Seite. Das bedeutet, dass die Umgebungspunkte der 4er-Facette zur Berechnung mit einbezogen werden müssen. Abb. 1.8 zeigt die Umgebungspunkte für die schraffierte 4er-Facette. In der Facette werden die Kantenlängen mittels der gebildeten Splines berechnet. Die so ermittelten Längen können zur Konstruktion eines Viereckes im zweidimensionalen Raum genutzt werden. Ab diesem Punkt können die vorgestellten Dehnungsberechnungen eingesetzt werden.



**Abbildung 1.8:** 4er-Facette mit Umgebungspunkten [2]

## 1.3 Bisherige Dehnungs- und Rissmessung bei der Kaltumformung

Es gibt bereits einige Veröffentlichungen zum Thema Dehnungs- und Rissmessung bei Raumtemperatur mit Hilfe eines photogrammetrischen Systems.

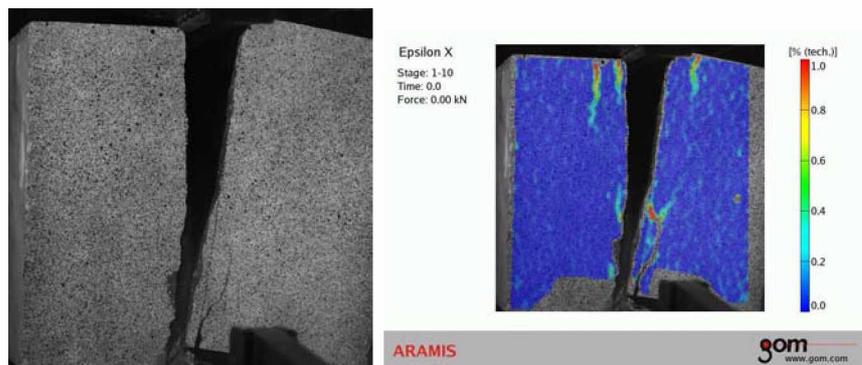
### 1.3.1 Spaltzugversuch an Verbundkörpern

Bei der Sanierung von Bauwerken besteht die Möglichkeit, die Struktur etwa durch z.B. Aufbetonieren zu verbessern. Dabei ist es von Bedeutung, Aussagen über die Beständigkeit einer derartigen Maßnahme machen zu können. In einer Veröffentlichung [9] wurde zu diesem Zweck Spaltzugversuche an Verbundkörpern durchgeführt.

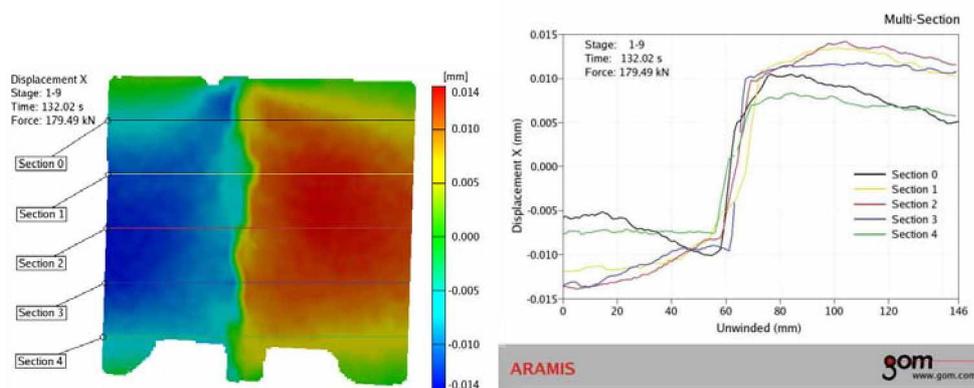
Versuche wurden mit verschiedenen Betonqualitäten und verschiedenen Methoden der Probenvorbereitung durchgeführt (unterschiedlich starkes Aufrauen der Altbetonoberflächen durch Sand- bzw. Wasserstrahlen; Variation des Wassergehalts der Altbetonkörper vor dem Aufbringen des Neubetons).

Aus plattenartigen Bauteilen werden für den Spaltzugversuch Würfel mit einer Kantenlänge von 15cm geschnitten – und zwar so, dass sich die Grenzfläche zwischen Alt- und Neubeton in der Mitte der Würfel befindet.

Für die Deformationsanalyse der Probenoberfläche und die Ermittlung des Bruchverhaltens inkl. der Rissentstehung wird das Messsystem ARAMIS eingesetzt (Abb. 1.9). Es ist erforderlich, die Würfel für die Messungen zu präparieren. Dazu werden sie mit einer Farbspraydose durch leichten Druck auf den Sprühknopf eingesprüht, so dass ein unregelmäßiges Kontrastmuster entsteht [9].



(a) Bild der linken Kamera. (b) Dehnungswerte in horizontaler Richtung. Gut sichtbar ist die Verbundfuge zwischen dem alten Beton links und dem neuen Beton rechts



(c) Deformation in horizontaler Richtung, kurz vor dem Bruch, mit Schnittlinien (d) Messwerte auf den Schnittlinien

**Abbildung 1.9:** Spaltzugversuch an einem Verbundkörper [9]

### 1.3.2 Einsatz von ARAMIS in der Bruchmechanik

Die Vorhersage des Rissfortschritts und des Bruchvorgangs stellt hohe Ansprüche an die Simulationsprogramme, sowie die Definition der dafür notwendigen Randparameter.

ARAMIS bietet durch die hohe Orts- und Messauflösung eine exzellente Möglichkeit numerische Berechnungen von Bruchvorgängen zu verifizieren.

Untersuchungen an kleinsten bruchmechanischen Proben, bei denen die Korngrenzen einen Einfluss auf den Rissfortschritt haben, sind genauso möglich, wie an den größtmöglichen Proben (CT, SENB, etc.). Ebenfalls lassen sich reale Bauteile mit Rissen untersuchen.

Die Ergebnisse sind die dreidimensionalen Verschiebungen  $x,y,z$ , sowie der ebene Dehnungstensor, aus dem die Verzerrungen  $\varepsilon_x$  und  $\varepsilon_y$  berechnet, graphisch dargestellt und im Benutzer definierten ASCII-Format exportiert werden können. Abb. 1.10b stellt die Verteilung der Verschiebung senkrecht zur Oberfläche dar. Direkt unterhalb des Risses tritt ein Einfall der Oberfläche, oberhalb des Lagers eine Aufdickung der Probe auf.

Neben den Dehnungsverteilungen lassen sich die Rissfortschrittlänge auf der Probenoberfläche, sowie makroskopische Kennwerte wie die Rissuferöffnung (CTOD, CMOD, COD) (Abb. 1.10c) bestimmen [6].

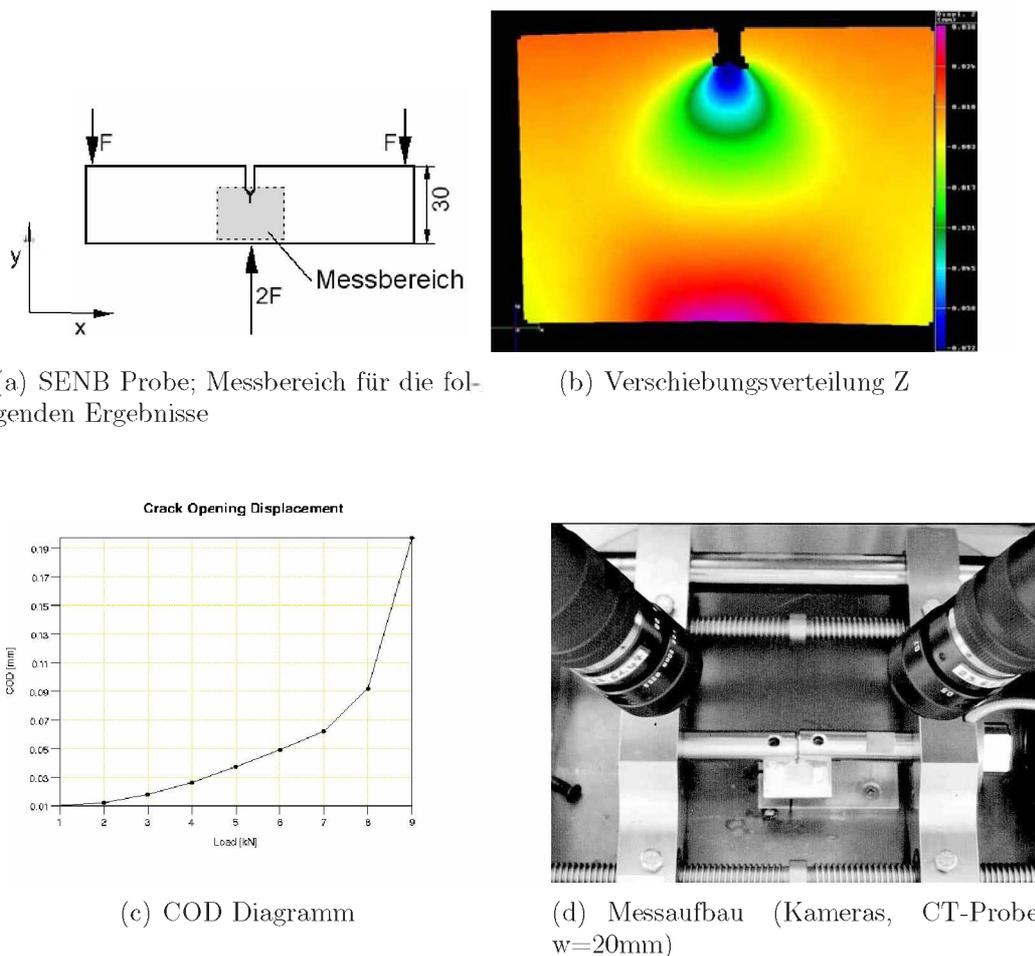


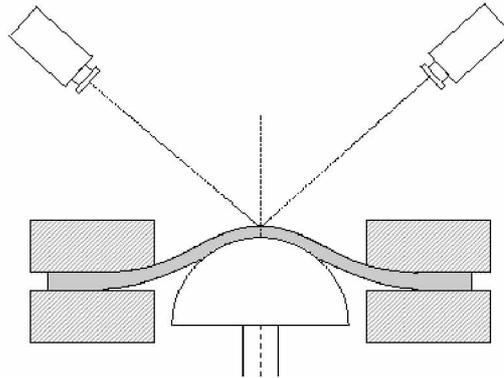
Abbildung 1.10: Einsatz von ARAMIS in der Bruchmechanik [6]

### 1.3.3 Bestimmung von Formänderungsdiagrammen

Eine Möglichkeit der Klassifizierung des Formänderungsvermögens und der Evaluierung des Umformprozesses eines Bleches stellen Formänderungsdiagramme dar. Diese können

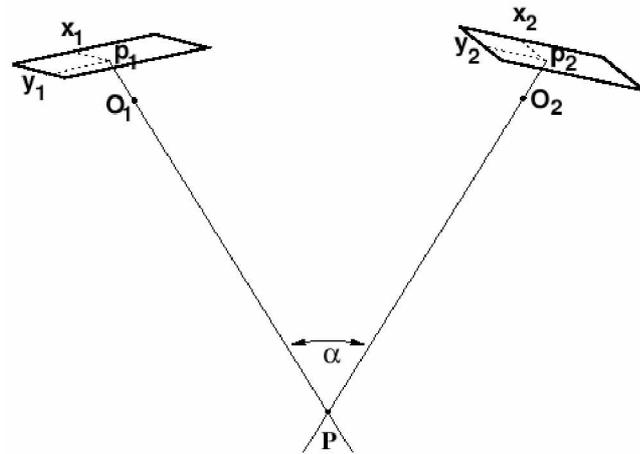
aus Versuchen mit optischen Systemen wie z.B. dem ARAMIS System ermittelt werden [15].

Ein hierfür herangezogener Versuch ist der Nakazima Test, bei dem eine runde Blechprobe eingespannt und durch einen halbkugelförmigen Stempel verformt wird (Abb. 1.11).



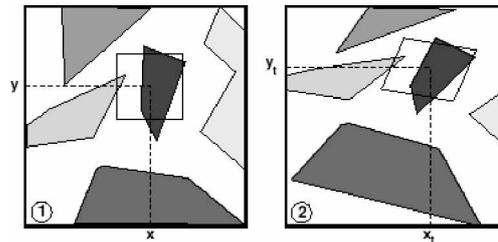
**Abbildung 1.11:** Schematische Darstellung des Nakazima Tests mit Ausrichtung der Kameras [15]

Die Abb. 1.12 zeigt schematisch die Ausrichtung des photogrammetrischen Systems. Die Kameras müssen mit dem zu vermessenden Punkt ein Dreieck bilden, wobei die beiden Sensoren die Basis bilden. Wenn die Position der zwei Kameras und die entsprechenden Bildpunkte  $p_1(x_1, y_1)$  und  $p_2(x_2, y_2)$  bekannt sind, kann der entsprechende Objektpunkt  $P(X, Y, Z)$  berechnet werden. Für diese Berechnung muß ein geometrisches Modell definiert werden, welches die Transformation von Bildpunkten auf Objektpunkte beschreibt. Die Berechnung wird mit Hilfe einer Matrix durchgeführt, deren Werte durch die Kalibrierung ermittelt werden.



**Abbildung 1.12:** Diagrammetrische Ausrichtung der Kameras [15]

Die Abb. 1.13 zeigt einen verformten und unverformten Zustand in 2D Darstellung.



**Abbildung 1.13:** 2D Intensitätsbeschreibung im unverformten (1) und verformten Zustand (2) [15]

Nach der Kalibrierung kann auf eine Probe eine Rasterung aufgebracht werden und nun der unverformte und der verformte Zustand mit den Kameras aufgenommen werden. Die Software berechnet die Verschiebung der Punkte an der Oberfläche, woraus sich z.B. die Dehnungen ermitteln lassen (Abb. 1.14).

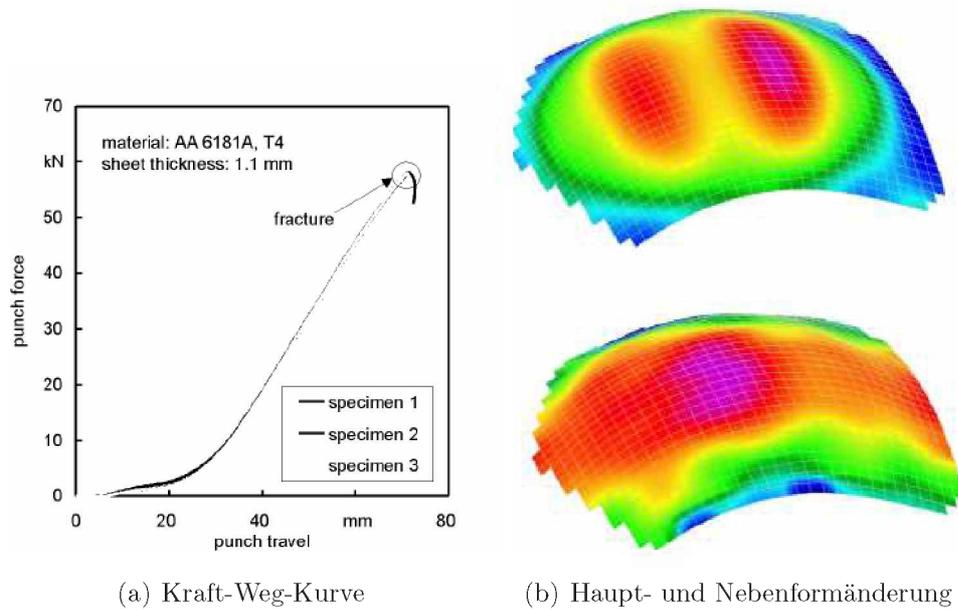


Abbildung 1.14: Auswertung des Nakazima Tests [15]

Aus den gewonnenen Daten lassen sich dann entsprechende Formänderungsschaubilder erstellen (Abb. 1.15).

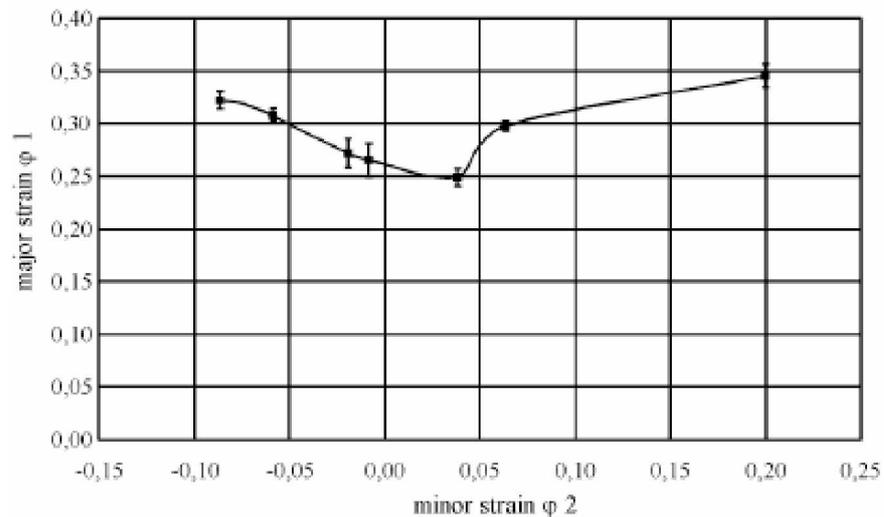


Abbildung 1.15: Formänderungskurve für AA6181 [15]

## 1.4 Einflussfaktoren

Bei der Verwendung von optischen Systemen kommen unterschiedliche Faktoren zum tragen welche sich oft gegenseitig beeinflussen. Diese hängen stark von der Art der Versuche (Warm- oder Kaltstauchen, Umformgrad), vom Versuchsaufbau und von der Probengröße bzw. -geometrie ab. Im Folgenden werden diese Faktoren beschrieben.

### 1.4.1 Abstand der Kameras vom betrachteten Objekt

Der Abstand der Kameras ist abhängig von dem zu betrachtenden Messvolumen. Dieses Volumen hängt wiederum von der Probengröße und der zu erwartenden Formänderung der Probe ab. Der Abstand ist limitiert durch die Objektive, die man nur bis zu einem minimalen Abstand scharfstellen kann. Zudem beeinflusst der Abstand zum Objekt den Winkel mit dem die Kameras dieses betrachten. Davon hängt es wiederum ab, ob eine Kalibrierung möglich ist bzw. wie genau diese vorgenommen werden kann.

### 1.4.2 Abstand der Kameras zueinander

Die Entfernung der Kameras zueinander hat Auswirkungen auf den Winkel und somit auf den betrachteten Bereich der Probe. Damit hängen bereits diese ersten beiden oben genannten Faktoren voneinander ab. Die Kalibrierung wird ebenfalls dadurch beeinflusst.

### 1.4.3 Blende

Die Blende regelt die Lichtmenge die durch das Objektiv auf den Sensor trifft. Die Schärfe wird mit maximal geöffneter Blende eingestellt. Für eine optimale Tiefenschärfe sollte die Blende weitmöglichst geschlossen sein. Bei flachen Proben, welche geringe Verformung erfahren, kann die Blende weit geöffnet bleiben. Das bedeutet, dass weniger Licht notwendig ist um Aufnahmen machen zu können. Kommt es aber zu großen Formänderungen, wie es beim Stauchen der Fall ist, so muss die Blende weitmöglichst geschlossen werden um scharfe Aufnahmen im gesamten Messvolumen zu erhalten. Da dadurch aber die Lichtmenge verringert wird muss für eine entsprechende zusätzliche Beleuchtung gesorgt werden.

#### 1.4.4 Belichtungszeit

Die Belichtungszeit ist die Zeit in der ein Bild aufgenommen wird. Je höher die Belichtungszeit umso weniger Licht ist notwendig um ein Bild aufzunehmen. Umgekehrt ist starkes Licht erforderlich bei geringer Belichtungszeit. Blende und Belichtung stehen in gegenseitiger Wechselwirkung.

#### 1.4.5 Aufnahmefrequenz

Die Aufnahmefrequenz ist die Anzahl der Bilder die pro Sekunde aufgenommen werden. Je höher die Aufnahmefrequenz umso geringer wird die mögliche Belichtungszeit, wodurch eine stärkere Lichtquelle erforderlich wird. Hier beeinflussen sich bereits drei Faktoren untereinander (Aufnahmefrequenz, Belichtung und Blende).

#### 1.4.6 Lichtquelle

Die Lichtquelle, sofern eine zusätzliche erforderlich ist, beeinflußt stark die Qualität der Aufnahmen. Sie begrenzt die Aufnahmefrequenz, welche in Wechselwirkung mit weiteren Faktoren steht. Zudem kann die Lichtquelle zu Reflexionen führen bzw. ungleichmäßig sein. Besonders bei zylindrischen Proben kann die Lichtquelle zu Reflexionsstreifen führen welche dann den auswertbaren Bereich einschränken. Daher ist die Art der Lichtquelle und deren Anordnung von Bedeutung. Eine z.B. von oben schräg nach unten scheinende Quelle vermindert die Reflexionen in der Aufnahme. Gestreutes Licht wirkt optimal doch ist es schwer deartiges Licht mit hoher Lichtstärke zu erhalten. Mit Hilfe eines Leintuches kann ein solches Licht erzeugt werden und bei entsprechend offener Blende und Belichtungszeit sind Aufnahmen möglich.

#### 1.4.7 Umformgeschwindigkeit

Dieser Faktor hat Einfluß auf die Aufnahmefrequenz. Je größer die Umformgeschwindigkeit ist desto mehr Bilder pro Sekunde sind erforderlich. Das heißt die maximale Umformgeschwindigkeit wird in erster Linie von der maximalen Aufnahmefrequenz limitiert. Durch die Wechselwirkung mit den Faktoren, Blende (Tiefenschärfe, Lichtmenge) und Belichtungszeit ist die maximale Umformgeschwindigkeit von Anwendungsfall zu Anwendungsfall eine andere.

### 1.4.8 Oberfläche

Die Oberfläche der Probe ist entscheidend wenn es darum geht Verformungen mit Hilfe eines optischen Systems zu erfassen. Zum einen kann es zu Lichtreflexionen kommen, zum anderen sind charakteristische Merkmale erforderlich mit deren Hilfe Berechnungen möglich sind. Diese Merkmale können bereits auf der Oberfläche vorhanden sein oder durch das Aufbringen eines regelmäßigen oder stochastischen Musters erzeugt werden.

### 1.4.9 Muster

Das Muster ist entscheidend für die Auswertbarkeit der Aufnahmen. Erst dadurch hat das betrachtete Objekt Merkmale, welche verfolgt und vermessen werden können. Die Qualität der Berechnung ist daher stark von dem aufgetragenen Muster abhängig. Je nach Anforderung müssen geeignete Methoden gefunden werden, eine Struktur auf das zu vermessende Objekt aufzutragen.

### 1.4.10 Probenform

Die Probenform hat z.B. Einfluss auf die Belichtung und Blende. Bei flachen Proben (z.B. Zugversuch) kann man die Blende weiter geöffnet lassen, da keine große Tiefenschärfe erforderlich ist, und somit die Aufnahmefrequenz erhöhen oder man benutzt gestreutes Licht. Bei zylindrischen Proben ist eine größere Tiefenschärfe erforderlich und zudem hat man Reflexionen des Lichts.

### 1.4.11 Anmerkung zu den Einflussfaktoren

Die hier betrachteten Faktoren mit ihrer Wechselwirkung gelten prinzipiell für jedes optische System. Dennoch ist die Stärke der Wechselwirkungen bei jedem System, welches modular zusammengestellt werden kann, unterschiedlich. So ist die Lichtmenge die auf den Sensor trifft, nicht nur von der Blende beeinflusst, sondern auch von der Lichtstärke des Objektivs. Der Bereich der gezoomt werden kann ist ebenfalls mit anderen Objektiven individuell auf den einzelnen Anwendungsfall abstimmbare. Die Aufnahmefrequenz und Belichtungszeit kann auch durch eine Verringerung der Pixelanzahl erhöht werden, was jedoch eine verringerte Auflösung bewirkt. Somit kann keine allgemeine Anleitung für

ein optimales Zusammenspiel der Einflussfaktoren gegeben werden. Ideen, wie ein messtechnisches Problem mit einem optischen Verfahren gelöst werden kann, geben diverse Veröffentlichungen wie diese Arbeit oder der Support des Anbieters.

## 2 Experimentelles

Im Folgenden werden die Stauchversuche mit Proben, gefertigt aus der Nickelbasislegierung Udimet 720 und der Aluminiumlegierung AA6082, beschrieben. Die Proben sind zylindrisch und werden ohne Schmierung, da Ausbauchen erwünscht ist, bei erhöhter Temperatur verformt. Das Ziel ist es Risse an der Oberfläche zu erhalten und den lokalen Umformgrad sowie die aktuelle Dehnung mit Hilfe einer photogrammetrischen Auswertung zu ermitteln. Es sollen die Möglichkeiten des ARAMIS-Systems zur Auswertung von Warmumformungen in Bezug auf Umformbarkeit und lokaler Rissbildung untersucht werden. Die gewonnenen Daten können z.B. für die Verifizierung von FE-Modellen herangezogen werden.

Für die Versuche wurden im allgemeinen Zylinderstauchproben verwendet, mit Ausnahme eines Versuches mit einer Kragenprobe. Die Proben aus Nickelbasiswerkstoff waren zylindrische Proben mit ebener Stirnseite und eine Bohrung auf mittlerer Höhe für das Thermoelement. Die Höhe der Proben war 24mm, und der Durchmesser 16mm. Die Kragenprobe hatte eine Höhe von 24mm einen Durchmesser von 16mm an den Stirnseiten und einen Kragendurchmesser von 22mm. Die Kragenprobe hatte keine Bohrung.

Die Proben der ersten Versuchsserie mit AA6082 waren Rastegaev Proben mit einer Höhe von 18,5mm und einem Durchmesser von 11,8mm. In der Mitte befand sich eine Bohrung für das Thermoelement.

Für die zweite Versuchsserie mit AA6082 wurden Zylinderstauchproben mit ebenen Stirnflächen, einer Höhe von 20mm und einem Durchmesser von 12mm gefertigt. Die Proben wurden mit Wasserstrahl herausgeschnitten und anschließend auf die Maße endgefertigt. Die Längsorientierung der Proben entsprach der Strangpressrichtung.

Eine dritte Versuchsserie mit AA6082 wurde gleich wie die zweite gefertigt, mit dem Unterschied, dass die Proben normal zur Strangpressrichtung aus der Stange geschnitten wurden.

### 2.1 Die Nickelbasislegierung Udimet 720

Die ersten Versuche mit Hilfe des ARAMIS-Systems Risse zu erfassen und auszuwerten, wurden mit der Nickelbasislegierung Udimet 720 durchgeführt. Das Probenmaterial (siehe Tab. 2.1) wurde von Böhler Schmiedetechnik GmbH & Co KG zur Verfügung gestellt. Bis

zu den Versuchen war es nicht sicher ob auch wirklich Risse an der Oberfläche entstehen, wie sie zum Teil bei Schmiedeprozessen aufgetreten sind. Es ist nicht möglich gleiche Umformgrade und insbesondere den entsprechend gleichen Wärmefluss in den Versuchen wiederzugeben. Bei sehr hohen Umformgraden ist ein optische System nicht mehr in der Lage Messungen durchzuführen (siehe Kap. 1.4).

Die Legierung Udimet 720 wird im VIM (Vaccum Induction Melting), ESR (Electro Slag Remelting) und VAR (Vaccum Arc Remelting) Verfahren hergestellt. Im VIM Prozess wird die Legierung aus den reinen Legierungselementen unter Vakuum erschmolzen. Das ESR / VAR Verfahren dient zur Raffination, d.h. zur Beseitigung evt. vorhandener Oxideinschlüsse, sowie zur Beseitigung von evt. vorhandener Block- oder Kristallseigerungen [16].

Während des Schmiedeprozesses kommt es je nach den gewählten Umformbedingungen und der Temperaturführung zur Ausbildung eines Gefüges mit gleichmäßiger Korngrößenverteilung oder zur Ausbildung einer so genannten Doppelstruktur mit unterschiedlichen Korngrößen. Beide Male bleibt die sehr grob ausgebildete  $\gamma'$ -Phase  $\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti})$  an den Korngrenzen erhalten. Im Zuge der sich anschließenden technischen Wärmebehandlung wird die sekundäre  $\gamma'$ -Phase im Korn vollständig gelöst und während der zweistufigen Auslagerung gezielt im Korn ausgeschieden. Die primäre  $\gamma'$ -Phase wird davon kaum beeinflusst.

Die Legierung Udimet 720 besteht aus mehreren Phasen:

- Matrix: Kubisch-flächenzentrierte Mischkristallmatrix ( $\gamma$ -Phase) mit hohem Anteil an Co, Cr, Mo und W.
- Aushärtungsphase: Intermetallische Aushärtungsphase der nominellen Zusammensetzung  $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$  mit der geordneten  $\text{L1}_2$  – Struktur ( $\gamma'$ -Phase).
- Karbide: Es treten Karbide des Typs MC,  $\text{M}_{23}(\text{C},\text{B})_6$  auf.

Die mittlere Korngröße des geschmiedeten und wärmebehandelten Bauteils beträgt ca. 10  $\mu\text{m}$  (ASTM 10-11).

**Tabelle 2.1:** Zusammensetzung von UDIMET720 in Gewichtsprozent

	Al	B	C	Zr	Co	Cr	Mo	Ti	W	Ni
U720	2,50	0,03	0,03	0,03	14,5	18,00	3,00	5,00	1,30	Rest

## 2.2 Die Aluminiumlegierung AA6082

Die Legierung AA6082 (s. Tab. 2.2) ist eine aushärtende Aluminiumlegierung die etwa in Strangpressanlagen zu diversen Profilen weiterverarbeitet wird. Eingesetzt wird diese Legierung z.B. im Automobilbau.

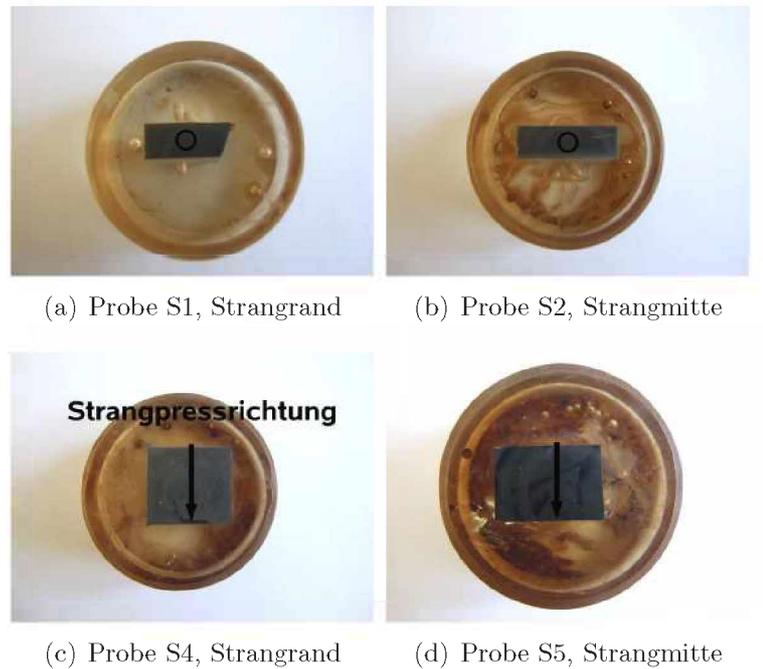
Die Legierung enthält zusätzlich zu Magnesium einen hohen Anteil an Silizium um die Aushärtung zu erhöhen. Mit Mangan wird die Korngröße kontrolliert. Die Eigenschaften werden durch die chemischen Zusammensetzung und der Prozessparameter stark beeinflusst. Stranggepresste Produkte weisen zeitweise eine gemischte Kornstruktur auf, da beim Strangpressen eine Teilrekristallisation auftreten kann. Aluminiumlegierungen haben im Allgemeinen eine hohe Stapelfehlerenergie (SFE). Die entscheidenden Entfestigungsmechanismen bei Al-Legierungen sind die dynamische Erholung (DRV) und die statische Rekristallisation (SRX) zwischen aufeinander folgenden Schritten einer mehrstufigen Umformung [17].

**Tabelle 2.2:** Zusammensetzung von AA6082 in Gewichtsprozent

Si	Mn	Zn	Fe	Mg	Ti	Cu	Cr
1,1-1,2	0,45-0,55	<0,1	<0,3	0,75-0,85	<0,05	0,05-0,1	0,11-0,15

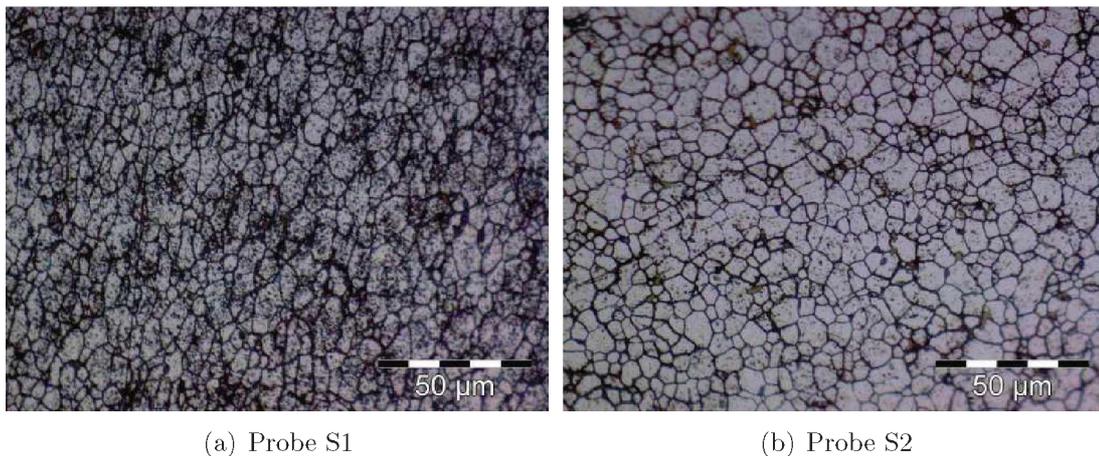
### 2.2.1 Metallographische Auswertung

Die Abb. 2.1 zeigt die Strangpressrichtung in den metallographischen Proben an. Das Gefüge weist eine Orientierung auf, welche Einfluß auf das Verformungsverhalten und die Rissbildung hat. Der Pfeil gibt dabei die Strangpressrichtung parallel zur Strangachse an. Der Kreis bedeutet eine Orientierung normal auf die Strangachse.



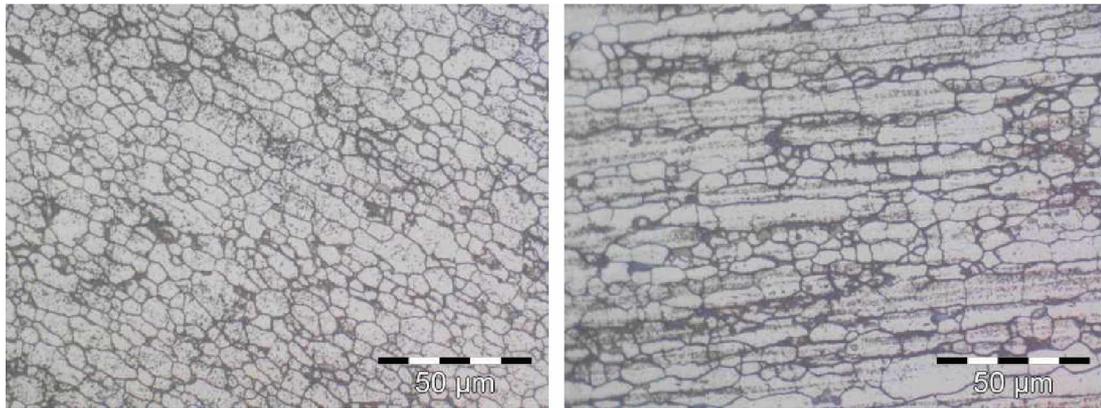
**Abbildung 2.1:** Orientierung der Proben, gefertigt aus dem stranggepressten Stangenmaterial

Die Abb. 2.2 zeigt die metallographische Untersuchung der Proben S1 und S2 welche aus der stranggepressten Stange entnommen wurden. Die Korngröße in beiden Proben unterscheidet sich nicht stark voneinander. Die mittlere Korngröße für die Probe S1 beträgt  $6,26\mu\text{m}$  und für die Probe S2  $6,99\mu\text{m}$ .



**Abbildung 2.2:** Querschliff normal auf die Strangpressrichtung von Probe S1 und S2

In Abb. 2.3 sieht man senkrecht auf die Strangpressrichtung auf die geätzte Probenoberfläche. Bei der Probe S4 beträgt die mittlere Korngröße  $6,00\mu\text{m}$  und bei der Probe S5  $6,79\mu\text{m}$ .



(a) Probe S4

(b) Probe S5

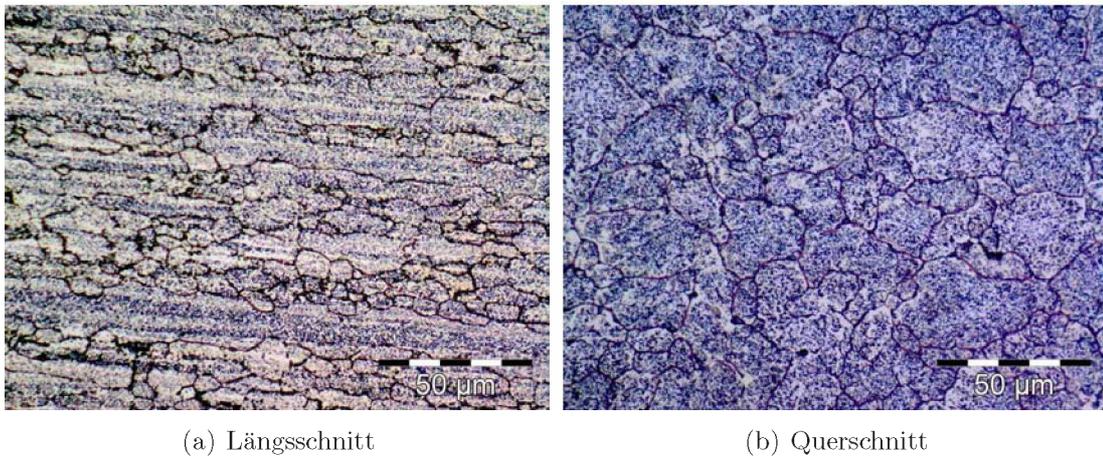
**Abbildung 2.3:** Querschliff in Strangpressrichtung von Probe S4 und S5

Die Abb. 2.4 zeigt eine Aluminiumprobe die in Strangrichtung herausgeschnitten, auf  $590^\circ\text{C}$  induktiv erwärmt, und anschließend 20 Sekunden bei dieser Temperatur gehalten wurde. Danach wurde die Probe in Wasser schnellstmöglich abgeschreckt.



**Abbildung 2.4:** Orientierung der Probe M1 im Strang

Die Probe M1 wurde der Länge nach und quer zur Längsorientierung geschnitten und kalt eingebettet. Nach der Ätzung erfolgte die Auswertung. In Längsrichtung beträgt die mittlere Korngröße  $9,76\mu\text{m}$  und in Querrichtung  $13,61\mu\text{m}$ . In Längsrichtung ist eine Orientierung der Körner in Strangpressrichtung zu erkennen (Abb. 2.5).



**Abbildung 2.5:** Metallographische Auswertung der Proben M1

## 2.3 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden an unterschiedlichen Umformaggregaten des Lehrstuhls für Umformtechnik gefahren. Die Versuche mit dem Nickelbasiswerkstoff erfolgten auf dem Umformsimulator (Servotest, Abb. 2.6). Die Anlage besitzt einen Manipulator und ermöglicht ein induktives Erhitzen der Proben. Die Aluminiumproben wurden mit der 1MN Hydraulikpresse gestaucht.

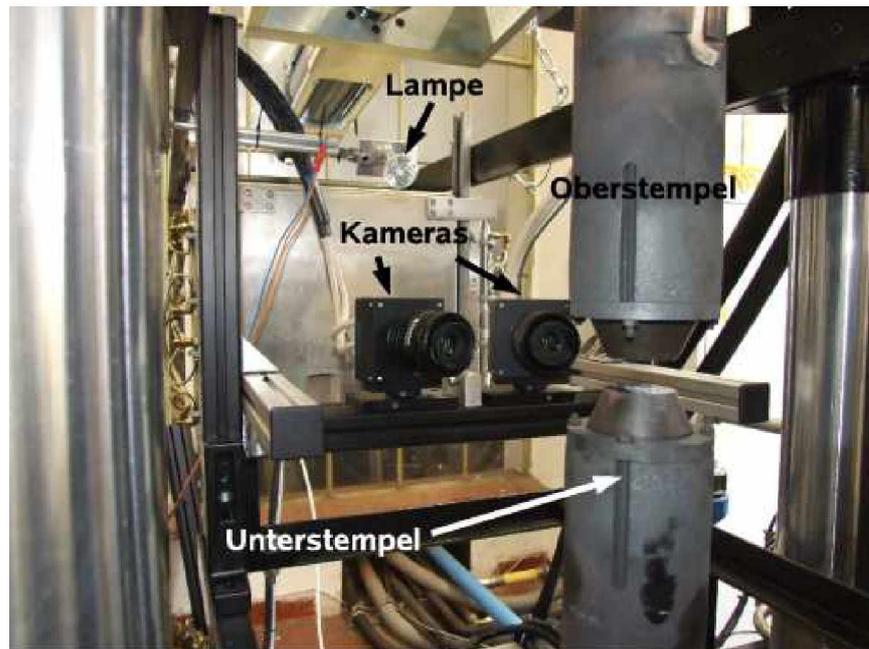


Abbildung 2.6: Versuchsaufbau in der SERVOTEST

In Abb. 2.7 ist die Versuchsanordnung in der 1MN Hydraulikpresse zu sehen. Man erkennt Ober- und Unterstempel aus einem Nickelbasiswerkstoff, den Induktor mit einer Spule aus zwei Windungen und die beiden Kameras des ARAMIS-Systems.

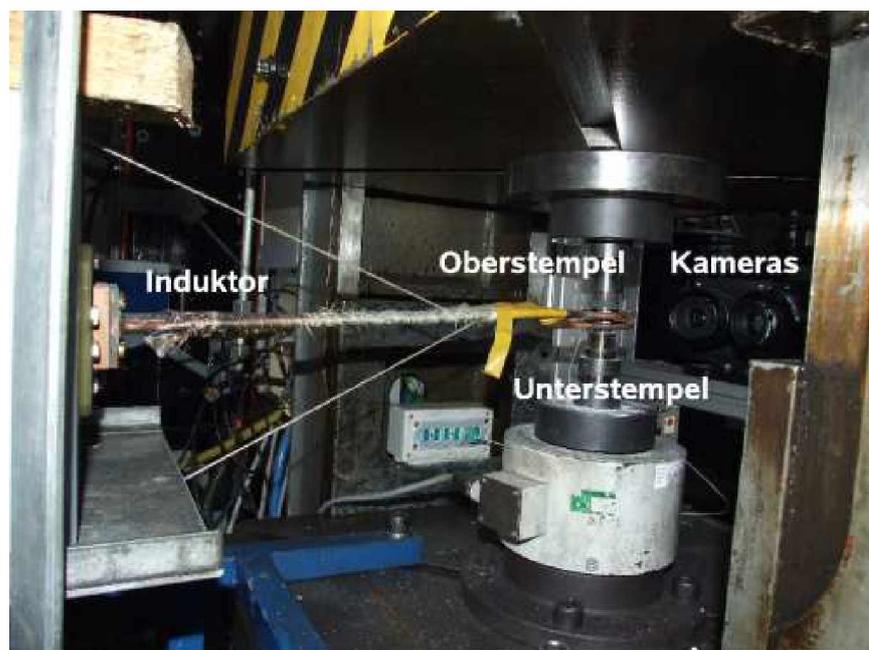


Abbildung 2.7: Versuchsaufbau in der hydraulischen 1MN Presse

In Abb. 2.8 ist zu sehen, dass der Scheinwerfer die Probe nicht senkrecht bestrahlt. Durch das von oben auf die Probe scheinende Licht werden ungünstige Reflexionen an der Probe vermindert bzw. verhindert, sofern dies nicht schon durch die Titanoxid-Grundierung der Probe geschieht. Ein Problem dabei ist die Abschattung durch den Stempel während des Stauchens.



Abbildung 2.8: Beleuchtung mit Scheinwerfer

## 2.4 Einflüsse auf den Versuchsablauf

Bei den Versuchen haben einige Faktoren direkten Einfluss auf den Versuchsablauf und die daraus gewonnenen Ergebnisse. Deshalb wird im folgenden auf diese und deren Auswirkung im einzelnen eingegangen, sowie Ursachen und mögliche Verbesserungen besprochen, einige sind zum Teil bereits erwähnt worden.

### 2.4.1 Aufheizen der Probe mit Induktor

Für die Versuche stand eine Induktionsanlage zur Verfügung. Ein wesentlicher Aspekt bei der Verwendung eines solchen Gerätes ist die Regelung. Bei großer Leistung wird die Probe schnell auf Temperatur gebracht, aber bei Erreichen der Temperatur kommt es zu einem Übersteuern. Das bedeutet, dass die Temperatur leicht über die Solltemperatur und beim Herunterregeln, unter die vorgegebenen Temperatur gehen kann. Durch dieses star-

ke Pendeln der Temperatur ist es schwierig bei einer bestimmten konstanten Temperatur den Versuch durchzuführen. In den hier gemachten Versuchen wurde die Leistung daher entsprechend niedrig eingestellt. Zudem kann es bei starkem Überschreiten der Solltemperatur zu einem unerwünschten Aufschmelzen der Probe kommen. Bei der untersuchten Aluminiumlegierung kann bei einer Solltemperatur von  $590^{\circ}\text{C}$  eine Übersteuerung um mehr als  $20^{\circ}\text{C}$  mit einem Schmelzen des Materials verbunden sein, im harmlosesten Fall mit einer signifikanten Deformation, bedingt durch die Wärmeausdehnung und Einspannung in der Presse (Abb. 2.9). Die abgegebene Leistung ist auch von der eingesetzten Induktionsspule abhängig. Windungszahl und Form sind dabei entscheidend. Allein um eine gute Spule zu erhalten sind viele Versuche und Optimierungen erforderlich. Da hier nur die grundlegende Einsatzmöglichkeit des optischen Verfahrens untersucht werden sollte, ist eine bestehende Spule mit zwei Windungen zum Einsatz gekommen. Das induktive Aufheizen hat nicht nur auf die Probe selbst sondern auch auf die verwendeten Stempel Einfluss. Es ist nicht einfach, die genaue Temperatur zu ermitteln welche in der Kontaktzone zwischen Stempel und Probe herrscht. Bei einigen Versuchen zeigte sich, dass die Temperatur des Stempels etwa um  $20^{\circ}\text{C}$  höher liegen kann als in der Probenmitte. Das ist insofern zu berücksichtigen, als bei Temperaturen etwas über  $600^{\circ}\text{C}$  bereits die ersten Aufschmelzungen in AA6082 auftreten können (Liquidustemperatur von AA6082:  $580\text{-}590^{\circ}\text{C}$ ).



**Abbildung 2.9:** Bei starker Übersteuerung des Induktors kann die Probe überhitzen

### 2.4.2 Hubtisch

Die Versuche dienen dazu, ein optisches System auf seine Anwendbarkeit bei der Warmumformung zu testen. Ein solches System erfordert daher eine freie Sicht auf das zu erfassende Objekt. Dadurch ist es notwendig die Induktorspule vor Beginn der Messung aus dem Sichtfeld der Kameras zu entfernen und so den Blick auf die Probe zu ermöglichen. Das Problem dabei ist die Verzögerung, die der hier verwendete Hubtisch (Abb. 2.10) aufweist. Es dauert einige Sekunden bis dieser oben ist, wodurch die Probe bereits auskühlt und somit die gewünschte Stauchtemperatur nicht gehalten werden kann. Ein weiteres Problem ist das Schwingen der Spule, welche dadurch bei der Aufnahme ins Bild geraten kann. Durch Abspannungen mit einer Schnur ist es möglich die Spule so steif werden zu lassen, dass keine Beeinträchtigung der Aufnahmen erfolgt (Abb. 2.11).

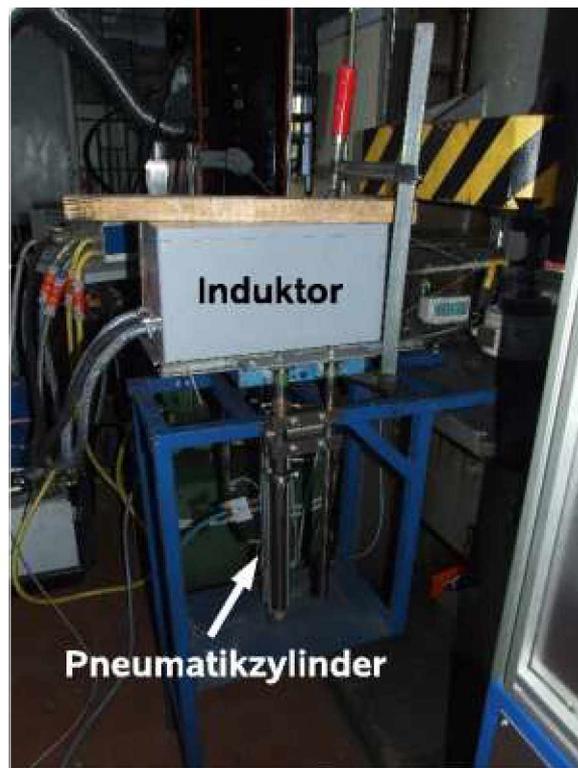


Abbildung 2.10: Der Hubtisch mit Induktor



**Abbildung 2.11:** Mit Hilfe von Schnüren wird verhindert, dass die Spule ins Bild schwingt

### 2.4.3 Versuche ohne Schmierstoff

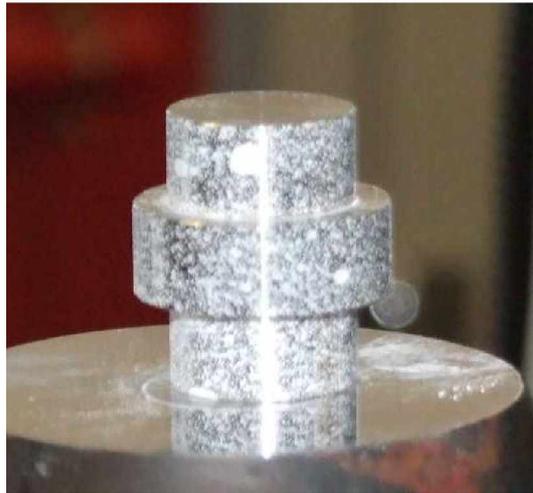
Um zu erreichen dass sich Risse bilden, sollen sich die zylindrischen Proben ausbauchen. Dadurch entwickeln sich Zugspannungen in der Umfangsrichtung der Probe, die zu einer ersten Rissbildung führen können. Das ist zu erreichen indem man auf die Stirnflächen der Proben und auf die Stempel kein Schmiermittel aufträgt. Bei den Versuchen zeigte sich das Problem, dass die Versuchsproben an den Nickelbasisstempel festklebten. Das bedeutete ein mühsames Entfernen der Probe vom Stempel. Da aber die Proben immer nur an einem der Stempel hafteten, stellte sich die Frage nach der Ursache. Die Überlegung war, dass eine Seite der Probe durch das Beschichten mit Titanoxid behaftet war und daher, je nachdem wie die Probe eingelegt wurde, diese am oberen oder unteren Stempel haften blieb. Im Folgenden wurde daher vor Einsetzen der Proben auf beiden Stirnflächen Titanoxid aufgetragen, wodurch ein festes Haften der Probe an den Stempel verhindert wurde und sich diese leichter löste. Somit diente das Titanoxid als Trennmittel ohne die Reibung zu verringern.

## 2.5 Präparation der Versuchsproben

Es soll der Einsatz des photogrammetrischen Systems für die Warmumformung getestet werden. Das hier verwendete Aramis System benutzt zwei Kameras um Bilder von Objekten aufzunehmen, bei der Umformung mehrere Bilder in Folge. Diese Bilder werden von der Software nach eindeutig zuordenbaren Punkten abgesucht. Diese berechneten Punkte werden in der Software als Facetten bezeichnet. Verändert das Objekt seine Form, so verändert sich auch die Lage der Facetten. Die Verschiebungen werden berechnet und man erhält daraus die Verzerrungen und z.B. die Hauptformänderung. Wenn die zu untersuchende Objekt keine natürliche erkennbare Oberflächenstruktur ausweist muss zusätzlich eine entsprechende Struktur aufgebracht werden. Bei Versuchen bei Raumtemperatur kann ein solches Muster mit Hilfe einer Ätzung erstellt oder mit Sprühlacken, wie sie in Vorversuchen verwendet wurden, aufgebracht werden. Es hat sich als Vorteil herausgestellt, Proben mit einem matten weißen Lack zu grundieren und anschließend ein stochastisches Muster mit matten schwarzen Lack aufzusprühen. Die Grundierung reduziert bzw. verhindert die Reflexionen des Lichts, welche Bereiche unauswertbar machen können, zudem wird der Kontrast zu dem dunklen Sprühmuster erhöht. Bei hohen Temperaturen ist der Einsatz von Lack bedingt möglich, besser ist der Einsatz von hitzebeständigen Substanzen. Für die Verwendung bei hohen Temperaturen eignet sich Titanoxid, es reagiert kaum mit seiner Umgebung und liefert einen guten Kontrast. Das Muster selbst muss erst aufgebracht werden, im Folgenden werden drei Methoden beschrieben.

### 2.5.1 Aufspritzen eines Punktemusters

Bei dieser Methode wird das feine Titanoxidpulver mit Spiritus vermischt und anschließend mit Hilfe eines Pinsels oder einer Sprühflasche aufgespritzt. Die Schwierigkeit dabei ist es, nicht zu große Punkte zu erzeugen. Diese Methode kam bei den Versuchen mit Nickelbasisproben zum Einsatz (Abb. 2.12).



**Abbildung 2.12:** Kragenprobe mit Titanoxidmuster. Zu sehen ist auch die Reflexion des Lichts

### 2.5.2 Erstellen eines regelmäßigen Musters mit einer Airbrush

Große Schwierigkeiten bereiten besonders bei runden Proben die Reflexionen an der metallischen Oberfläche, die es dem ARAMIS-System erschweren bis unmöglich machen Punkte in diesem Bereich zu erfassen. Um dieses Problem in den Griff zu bekommen wurde versucht eine Titanoxid-Grundierung aufzutragen, wodurch die Reflexionen des Lichts vermindert werden. Auf diese weiße Unterschicht wird nun ein Muster mit Eisen(III)oxid aufgebracht. Für das Auftragen von Titan- und Eisenoxid kam eine Airbrush zum Einsatz (Abb. 2.13).



Abbildung 2.13: Airbrush von Revell

Bei den ersten Proben wurde versucht mit Hilfe einer Schablone, in diesem Fall eine Scherfolie eines Rasierers, ein regelmäßiges Muster aus Eisen(III)oxid aufzusprühen (Abb. 2.14). Diese Methode erfordert eine große Sorgfalt beim Arbeiten, da die Grundierung und auch die erzeugten Punkte sehr leicht verschmiert werden können.



Abbildung 2.14: Probe unpräpariert (links), mit Grundierung (Mitte), mit Muster (rechts)

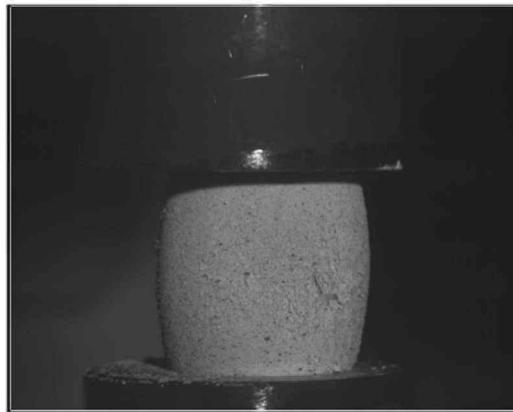
### 2.5.3 Erstellen eines stochastischen Musters mit einer Airbrush

Bei den späteren Versuchen kam ein stochastisches Muster zur Anwendung (Abb. 2.15), welches mit der Airbrush aufgetragen wurde. Die Grundsicht aus Titanoxid darf nicht zu dick aufgetragen werden, da es ansonsten zu einem Abplatzen der Schicht während der Verformung kommt. Die Dicke sollte etwas so stark sein, dass kaum noch Metall

durchscheint, was an den abnehmenden metallischen Reflexionen zu erkennen ist. Es zeigte sich, dass es von Vorteil ist, die Proben erst vor den eigentlichen Versuchen zu präparieren. Offenbar nimmt das Titanoxid Feuchtigkeit auf und es kommt dann zu einem Ablösen während der Umformung, wodurch das Muster unbrauchbar wird (Abb. 2.16).



**Abbildung 2.15:** Grundierung mit Titanoxid und Muster aus Eisen(III)oxid



**Abbildung 2.16:** Ablösen der Titanoxidschicht während der Warmumformung

## 3 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden einige der Versuche im Detail besprochen. Das Ziel war, Risse bei der Umformung zu erhalten, die Rissentstehung bildanalytisch zu dokumentieren und die auftretenden lokalen Dehnungen im Zuge der Rissentstehung zu messen. Die Stellen, bei denen sich ein Riss bildet, sollten bei der Auswertung der Bilddaten sichtbar sein. Zu diesem Zweck wurden die berechneten Bilder mit den originalen Aufnahmen verglichen. Während der Versuche zeigte es sich, dass der Versuchsaufbau nicht optimal war, insbesondere was die Reproduzierbarkeit der Versuche angeht. Ein Hauptproblem ist, dass die Proben nicht bei konstanter Temperatur gestaucht werden können. Aufgrund der Tatsache, dass ein freier Blick der Kameras auf die Probe sichergestellt werden muss, wäre eine entsprechende Heizkammer erforderlich. Eine solche Vorrichtung müsste in Zukunft konstruiert und gefertigt werden. Ein weiteres Problem stellte der Hubtisch dar, der mit erheblicher Verzögerung reagierte. Dadurch kühlte die Probe bis zu 10°C ab, bevor gestaucht wurde. Für zukünftige Versuche sollte des Weiteren eine Messung der Temperatur mit der Aufnahme der Bilder verknüpft werden, damit jedem aufgenommenen Bild auch eine entsprechende Temperatur zugeordnet werden kann.

### 3.1 Versuche mit Udimet 720

Die Versuche anhand der Nickelbasislegierung Udimet 720 wurden am Umformsimulator Servotest durchgeführt, der für die Verformung von hochwarmfesten Werkstoffen bestens geeignet ist. Die Proben zeigten ein Abscheren, aber nicht die erwünschte Rissbildung an der Oberfläche. Zudem war eine erfolgreiche Auswertung mit dem optischen System nur in wenigen Fällen möglich. Beim ersten Versuch wurde die Kerntemperatur gemessen, in den folgenden die Temperatur an der Oberfläche. Die Temperatur wurde 30 Sekunden lang gehalten, gefolgt von der Umformung der Probe. Die Bildaufnahme wurde manuell ausgelöst. Die größte Schwierigkeit bereitete die Beleuchtung. Die zylindrischen Proben neigten zu Reflexionen, wodurch nur mehr ein kleiner Teil der Probenoberfläche für das ARAMIS-System berechenbar wurde. Die Versuche an der Servotest wurden mit hoher Geschwindigkeit durchgeführt, dadurch ist eine hohe Aufnahmefrequenz erforderlich. Dabei sinkt die Belichtungszeit und es ist eine zusätzliche starke Beleuchtung erforderlich. Probleme zeigten sich in diesem Zusammenhang bei der Kontrastierung der Probenoberfläche mit dem aufgetragenen Muster, wodurch die Auswertung durch die Bildverarbei-

tungssoftware Aramis nicht ausreichend schien. Die entscheidenden Kriterien sind hier das Erstellen eines geeigneten Musters auf den Proben und die Beleuchtung.

In Tab. 3.1 sind die Versuche mit den dazugehörigen Parametern aufgelistet. Ein Versuch wurde mit einer Kragenprobe durchgeführt.

**Tabelle 3.1:** Versuche mit Udimet 720

Probe	Kern [°C]	Oberfläche [°C]	Haltezeit [s]	$\varphi$	$\dot{\varphi}$ [s <sup>-1</sup> ]	Anmerkung
1.2	1100		30	0.7	1	auswertbar
2.1		1000	30	0.5	5	nicht auswertbar
2.2		980	30	0.5	5	nicht auswertbar
3.1		970	30	0.5	5	nicht auswertbar
3.2		960	30	0.5	5	nicht auswertbar
4.1		960	30	0.5	5	nicht auswertbar
4.2		960	30	0.5	5	nicht auswertbar
5.1		960	30	0.5	5	nicht auswertbar
6.2		950	30	0.5	1	nicht auswertbar
7.1		950	30	0.5	1	nicht auswertbar
7.2		950	30	0.5	1	auswertbar
Kragen 1.1		980	30	0.5	1	nicht auswertbar

Der erste Versuch auf der Servotest verlief viel versprechend. Die Probe wurde auf 1100°C (1120°C ist die ideale Schmiedetemperatur dieser Legierung) Kerntemperatur induktiv erwärmt mit einer Haltezeit von 30 Sekunden. Die Zylinderstauchprobe wurde dann mit einer Umformrate von  $\dot{\varphi} = 1\text{s}^{-1}$  bis zu einem Umformgrad von  $\varphi = -0.7$  gestaucht. Das Werkzeug war dabei unbeheizt und es wurde nicht geschmiert. Die Verformung wurde mit dem ARAMIS-System aufgezeichnet und lieferte auswertbare Aufnahmen (Abb. 3.1).



**Abbildung 3.1:** Stauchversuch der Probe 1.2 auf der Servotest

Die Probe in Abb. 3.2 zeigt, mit Ausnahme des ersten Versuches, das bei allen anderen Proben auftretende Abscheren. Der durch das Abscheren entstehende Riss läuft dabei immer durch die Bohrung für das Thermoelement.



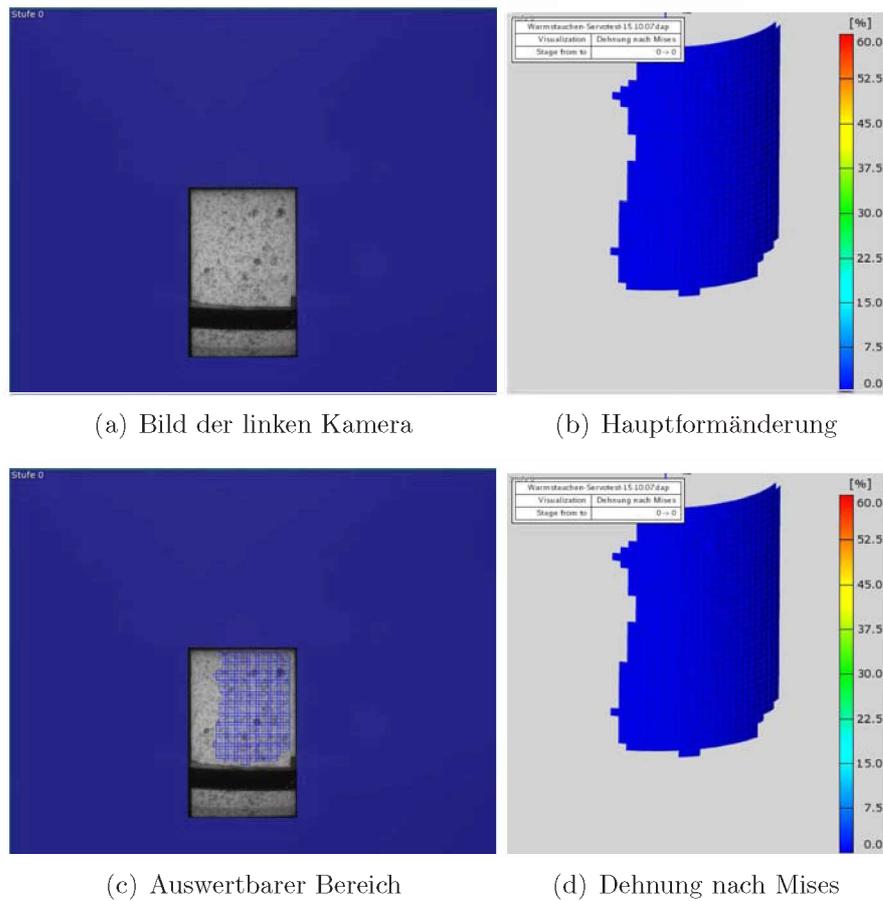
**Abbildung 3.2:** Versuch mit der Probe 5.1

Die Kragenprobe (Abb. 3.3) zeigt ebenfalls ein Abscherverhalten ohne Bildung von Rissen an der Oberfläche. Die Aufnahmen der Kameras waren nicht auswertbar.



**Abbildung 3.3:** Versuch mit Kragenprobe

In den Abb. 3.4 bis 3.11 ist die Auswertung der Probe 1.2 zu sehen. Der hohe Kontrast ergibt sich aus dem Glühen der Probe und den Titanoxidpunkten. Das weiße Oxid verfärbte sich dabei gelb. Aufgrund der relativ geringen Umformgeschwindigkeit ist eine niedrige Aufnahme Frequenz möglich, wodurch sich wiederum eine hohe Belichtungszeit ergibt.



**Abbildung 3.4:** Auswertung des ersten Bildes zu Beginn des Stauchvorganges, Probe 1.2

Im Zuge der fortschreitenden Verformung entstehen immer wieder Bereiche, in denen eine Berechnung der Facetten nicht möglich ist (Abb. 3.5). Die Software bietet die Möglichkeit die Fehlstellen zu interpolieren, dabei werden die Werte aus den umgebenden Facetten errechnet. Die kann jedoch zu Fehlinterpretationen führen, insbesondere bei der Rissentstehung mit einhergehenden lokalen Verzerrungsinhomogenitäten.

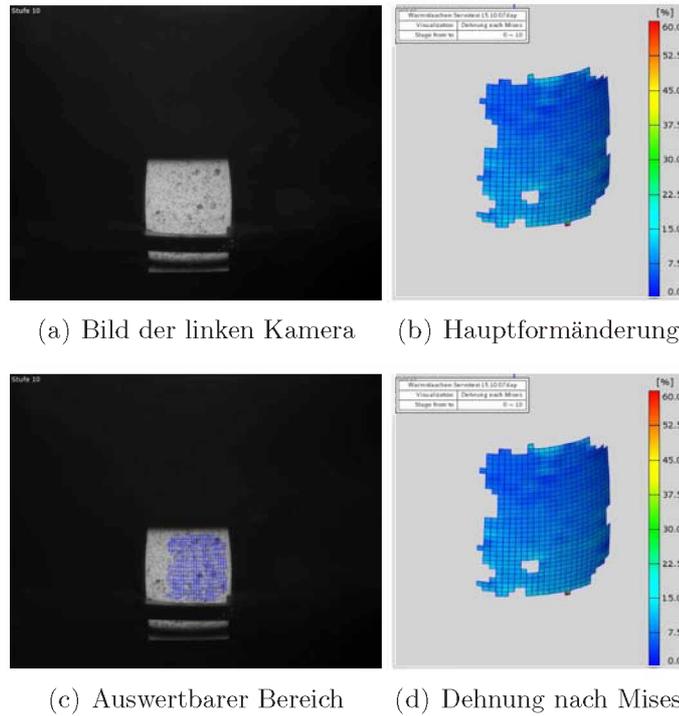


Abbildung 3.5: Auswertung der 10. Stufe, Probe 1.2

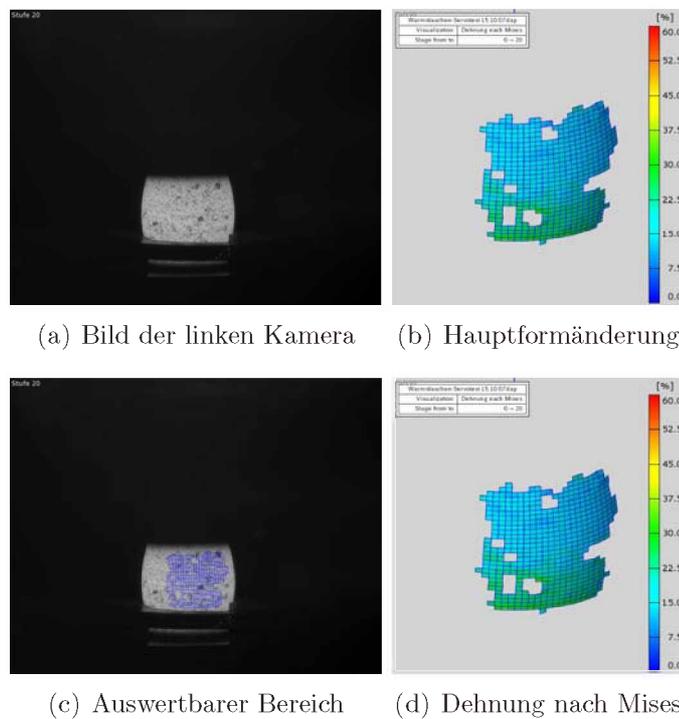


Abbildung 3.6: Auswertung der 20. Stufe, Probe 1.2

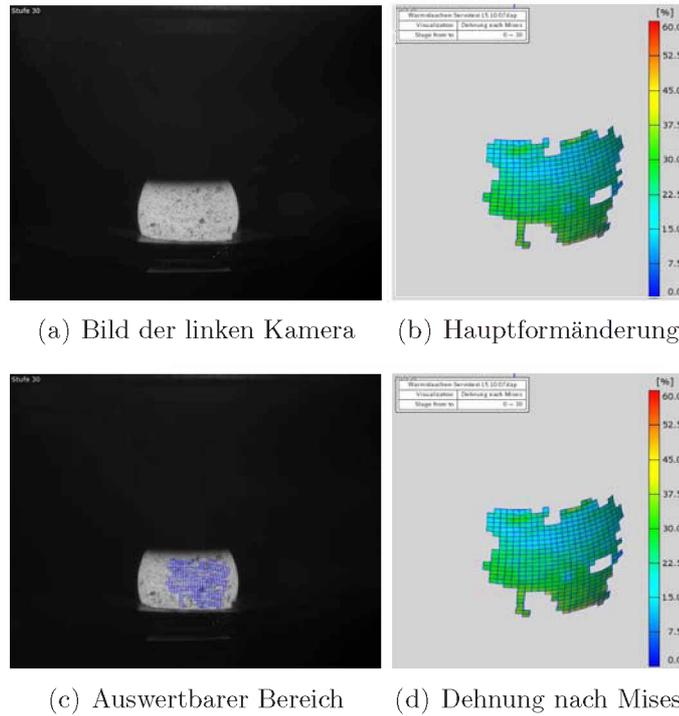


Abbildung 3.7: Auswertung der 30. Stufe, Probe 1.2

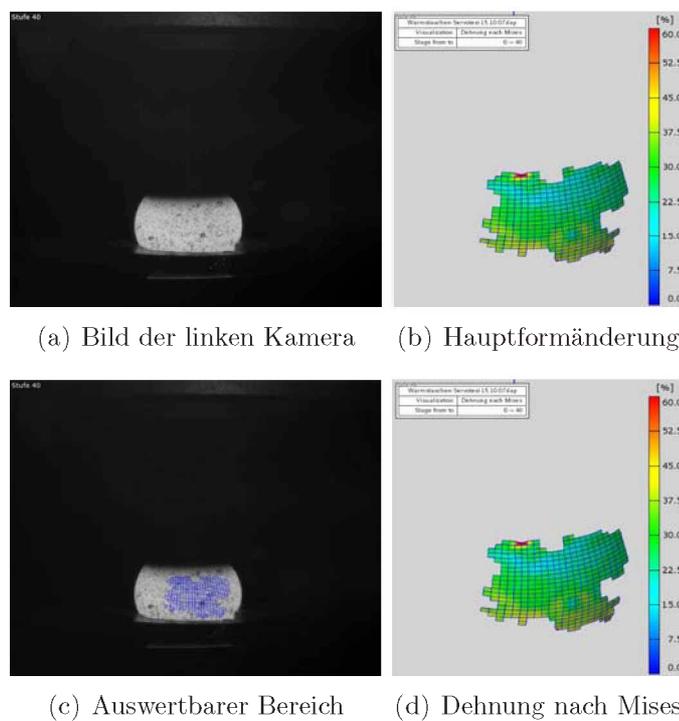


Abbildung 3.8: Auswertung der 40. Stufe, Probe 1.2

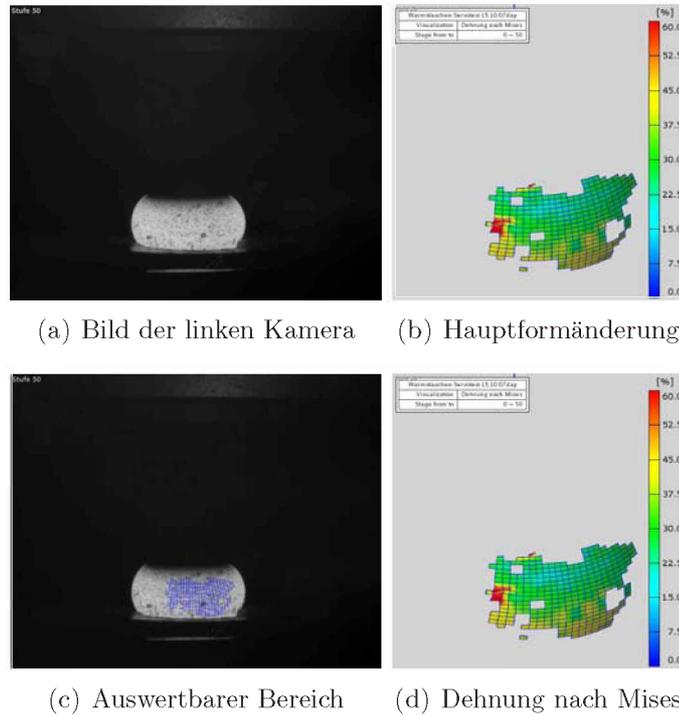


Abbildung 3.9: Auswertung der 50. Stufe, Probe 1.2

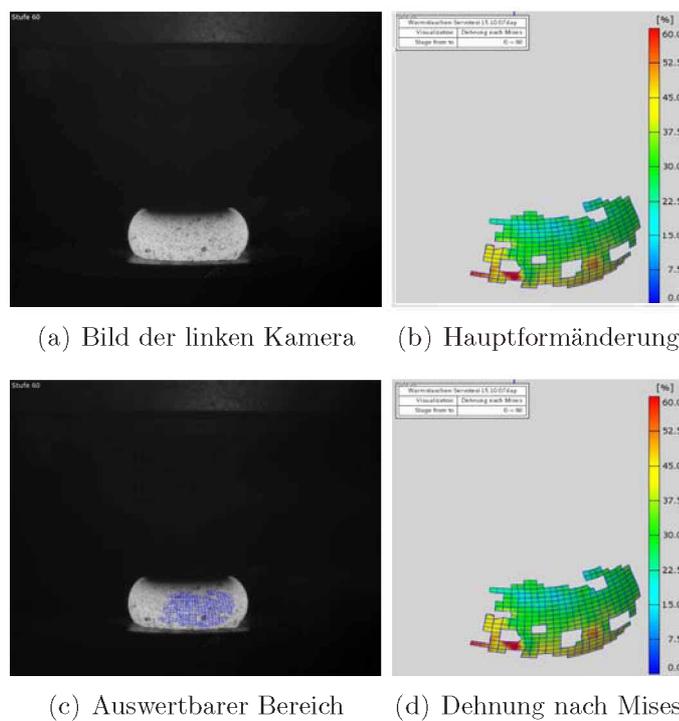
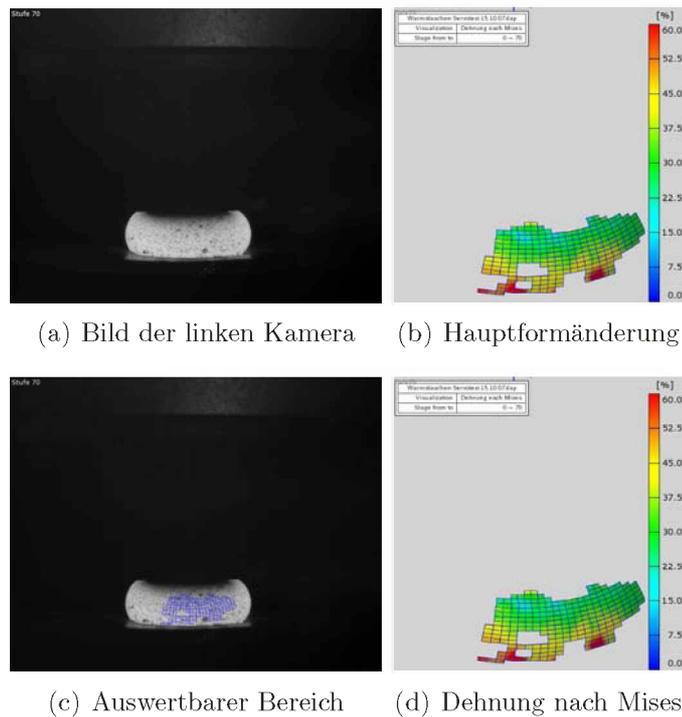


Abbildung 3.10: Auswertung der 60. Stufe, Probe 1.2



**Abbildung 3.11:** Auswertung der 70. Stufe

Die Abb. 3.12 bis 3.19 zeigen die Auswertung von Probe 7.2. Zu sehen ist bei den Bildern der linken und rechten Kamera der Reflexionsstreifen. Da jede Kamera einen anderen Blickwinkel auf das zu betrachtende Probenstück hat, ergibt sich ein recht breiter Bereich der aufgrund der Lichtspiegelung von der Software nicht mehr ausgewertet werden kann. Des weiteren sieht man wie der sich ausbauchende Bereich in eine  $45^\circ$  Neigung übergeht. Die Berechnung der Aufnahmen liefert ein dreidimensionales Bild der Oberfläche. Es ist auch zu sehen, dass die unerwünschte Reflexion des Lichts auch bei bereits hohem Umformgrad nicht verschwindet (Abb. 3.18).

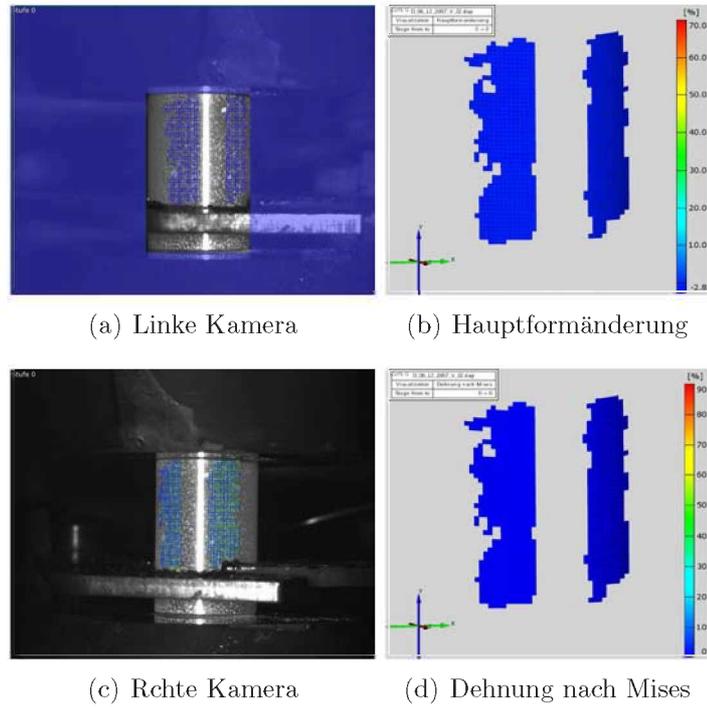


Abbildung 3.12: Auswertung der nullten Stufe, Probe 7.2

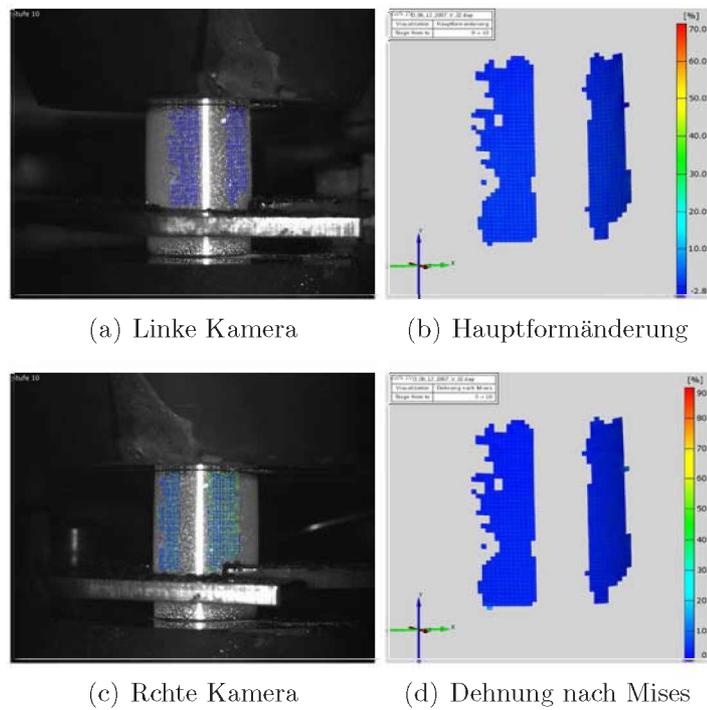


Abbildung 3.13: Auswertung der 10. Stufe, Probe 7.2

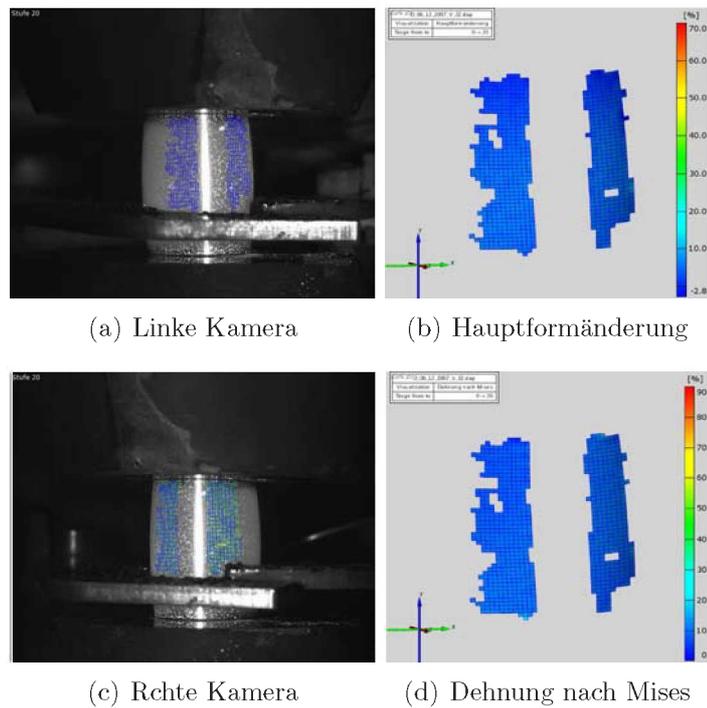


Abbildung 3.14: Auswertung der 20. Stufe, Probe 7.2

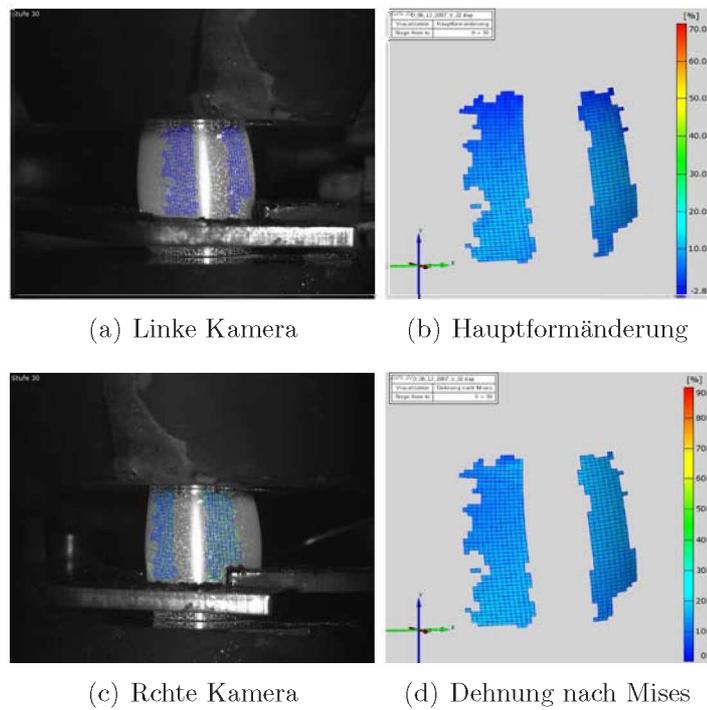


Abbildung 3.15: Auswertung der 30. Stufe, Probe 7.2

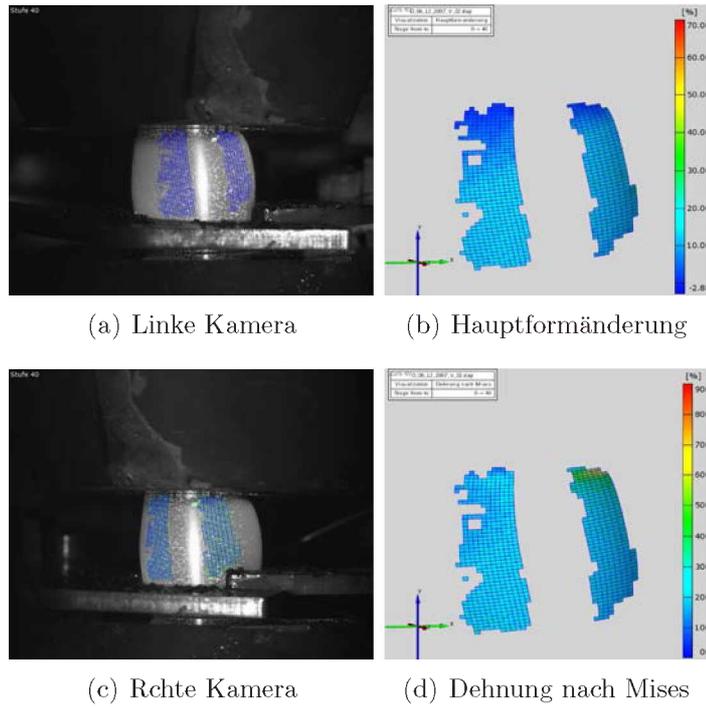


Abbildung 3.16: Auswertung der 40. Stufe, Probe 7.2

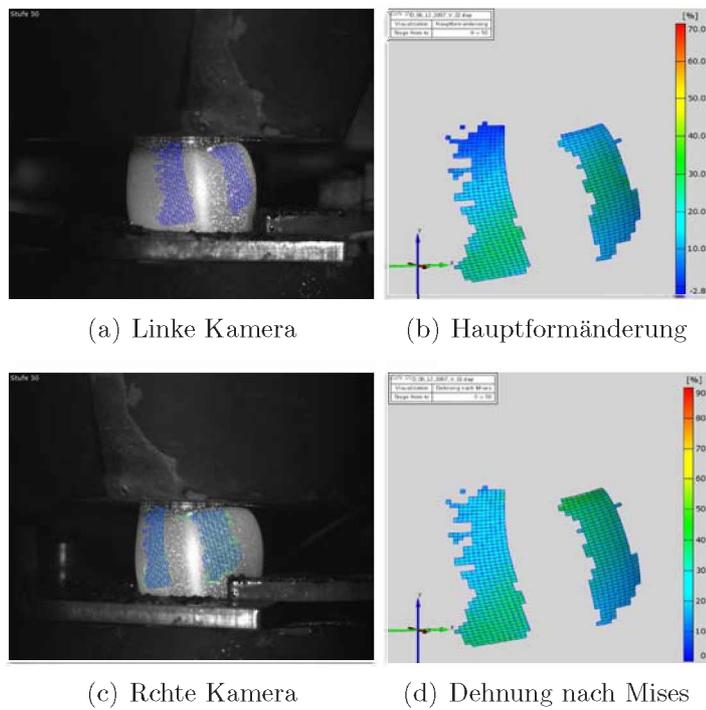


Abbildung 3.17: Auswertung der 50. Stufe, Probe 7.2

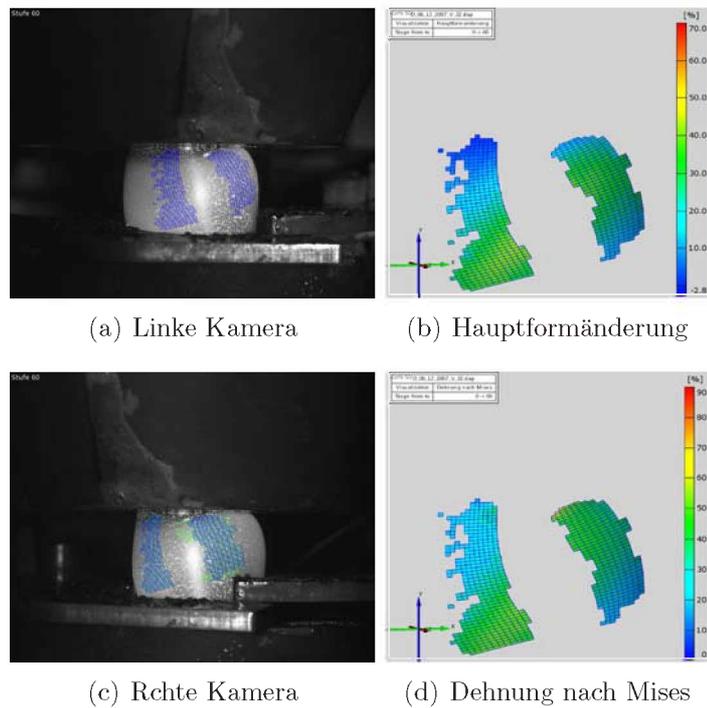


Abbildung 3.18: Auswertung der 60. Stufe, Probe 7.2

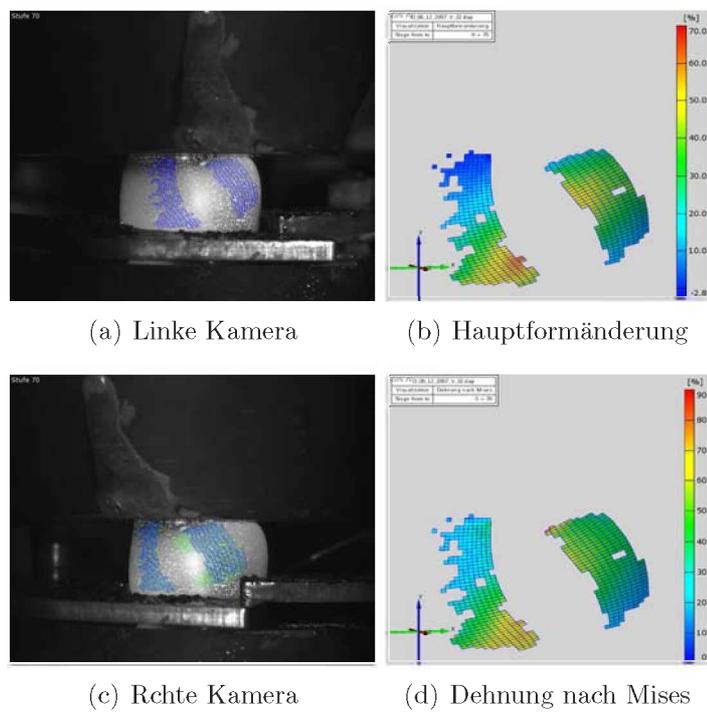
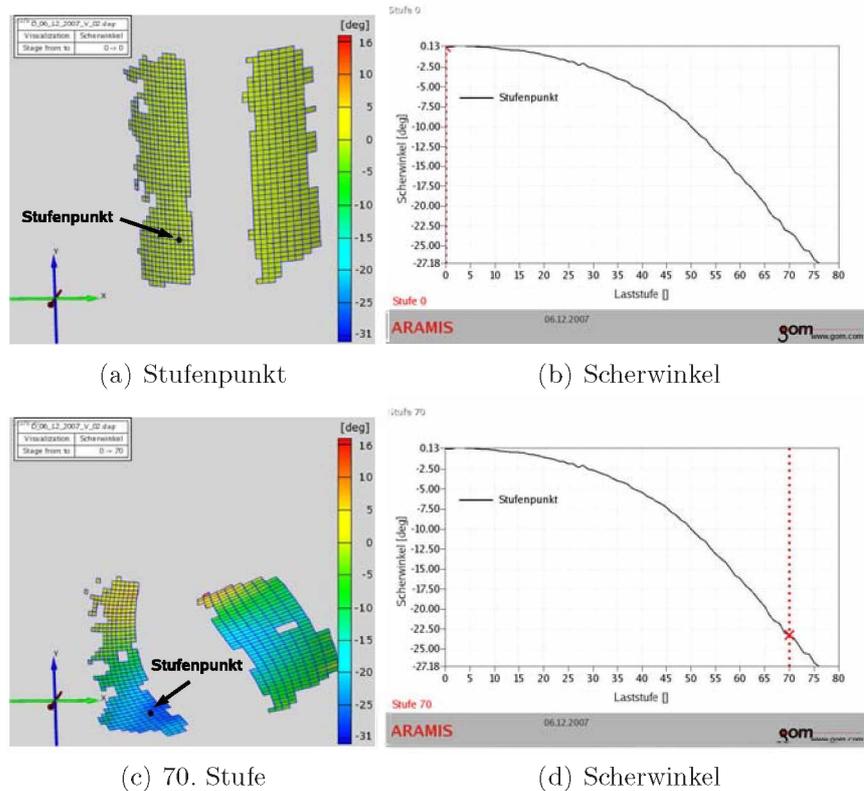


Abbildung 3.19: Auswertung der 70. Stufe, Probe 7.2

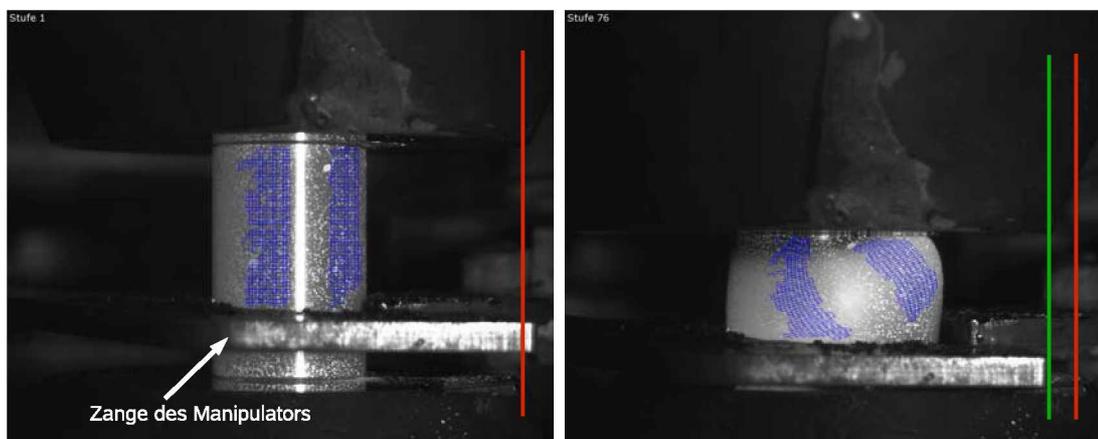
Als Beispiel für das Auftreten von globaler Materialschering soll die Auswertung des Scherwinkels für die Probe 7.2 gezeigt werden. Dazu wurde ein Stufenpunkt gesetzt und der Winkel über die Stufen ausgegeben (Abb. 3.20).



**Abbildung 3.20:** Scherwinkel zu Beginn (a,b) und in der 70. Stufe (c,d) für Probe 7.2

Mit Hilfe des Aramis Systems ist es nicht nur möglich entsprechend präparierte Werkstückobjekte zu vermessen, man kann auch die Werkzeuge im Umformprozess betrachten. Bei Finiten Elemente Modellen werden meist Idealannahmen getroffen. Das Werkzeug wird oft als unendlich steif betrachtet und der Weg läuft entlang genau definierter Bahnen [18]. In Wirklichkeit ist eine Presse elastisch und der Stempel bewegt sich nicht immer entlang eines exakten Weges. Das Werkstück kann den Stempel wegdrücken, z.B. dadurch, dass es abzuscheren beginnt und die Reibung hoch genug ist das Werkzeug mitzunehmen. Wenn das Werkzeug nicht exakt geführt wird, kann der Stempel Schub ausüben der zu einer zusätzlich Verformung oder Schädigung führt. Wenn der Weg des Werkzeuges bekannt ist, kann dies natürlich auch berücksichtigt werden und so das Modell auf die gegebenen Einflüsse hin optimiert werden. In der Abb. 3.21 ist die Lage des Stempels zu

Beginn (rote Linie) und am Ende des Stauchvorganges (grüne Linie) zu sehen, dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich um eine dreidimensionale Bewegung handelt.



(a) Lage des Oberstempels zu Beginn, rote Linie  
(b) Lage des Oberstempels am Ende des Stauchvorganges, grüne Linie

**Abbildung 3.21:** Bewegung des Oberstempels der Servotest

Bedingt durch einen hohen Temperaturgradienten, starke lokale Verfestigungen und auch der nicht axial-parallelen Stempelbewegung, zeigten sich nicht die erhofften Oberflächenrisse, stattdessen begannen die Proben abzuscheren. Aufgrund dieser Ergebnisse fiel die Entscheidung, ein anderes Material für nachfolgende Versuche zu verwenden. Für die nächsten Versuche wurde die Aluminiumlegierung AA6082 herangezogen, da aus Vorversuchen bekannt war, dass Proben im Stauchversuch bei  $580^{\circ}\text{C}$  zu einer starken Rissbildung neigten.

## 3.2 Versuche mit AA6082

Die Versuche mit der Nickelbasislegierung zeigten keine der erhofften Rissbildungen entlang des Probenumfangs, stattdessen nur ein Abscheren der Probenkörper. Um aber eine Rissbildung durch Ausbauchen der Probe an der Oberfläche zu erhalten war ein Werkstoff erforderlich der diese Anforderung erfüllen konnte. Aus Vorversuchen die mit der Aluminiumlegierung AA6082 durchgeführt wurden, war bekannt, dass es bei diesem Werkstoff ab einer Temperatur von  $580^{\circ}\text{C}$  zu Aufschmelzungen und damit zu einer Rissbildung kommt. Daher wurden für alle folgenden Versuche die Probenkörper aus dieser Legierung gefertigt. Für die zweite und dritte Versuchsserie bestand das Rohmaterial aus einer stranggepressten Stange, aus der Scheiben geschnitten wurden. Aus jeder Scheibe wurden fünf Proben

mit Wasserstrahl herausgeschnitten und anschließend auf die gewünschte Probenabmessungen spanend nachbearbeitet. Einige Proben wurden normal zur Strangpressrichtung gefertigt. Bei den Versuchen zeigte sich, dass die Lage der Probe in der Scheibe, sowie deren Ausrichtung, Einfluss darauf hatten, ob überhaupt Risse entstehen oder an welcher Stelle diese auftreten. Bei zukünftigen Versuchen sollte daher die Lage und Ausrichtung der Proben im Rohmaterial dokumentiert und gekennzeichnet werden. Dadurch werden bessere Aussagen zur Rissentstehung und auch -entwicklung in Bezug auf eine allfällige Verformungstextur möglich.

### 3.2.1 Versuche mit regelmäßigem Muster

Bei den ersten Versuchen mit der Aluminiumlegierung wurde versucht, ein Muster mit Hilfe einer Schablone, in diesem Fall eine Scherfolie eines Rasierers, aufzutragen. Zuerst wurden die Proben mit einer weißen Titanoxidschicht grundiert, um einen möglichst hohen Kontrast zu erzielen und um die Reflexion der Beleuchtung zu verhindern. Das dannach aufgebrachte regelmäßige Muster aus Eisenoxid lässt sich zu Beginn sehr gut auswerten wird aber im Zuge der Verformung stark gestaucht und verzerrt, so dass es für die Software nicht mehr analysierbar wird. Ein derartiges Muster ist somit nur bis zu einem gewissen Umformgrad geeignet. Bei Zugproben kann damit gerechnet werden, dass höhere Umformgrade vermessen werden können.

In Tab. 3.2 ist kurz die erste Versuchsserie mit AA6082 dargestellt. Die Proben wurden aus stranggepresstem oder gewalztem Material gefertigt. Die stranggepressten Proben zeigten eine Rissbildung während es bei den gewalzten Proben nur selten dazu kam. Man sieht auch, dass aufgrund der vielen Einflüsse auf den Versuch und der nicht optimalen Versuchsanordnung es schwer ist, brauchbare Ergebnisse zu erzielen. Hauptprobleme sind die inhomogene Temperaturverteilung in der Probe sowie der nicht isotherme Versuchsablauf.

Tabelle 3.2: Erste Versuchsserie AA6082

Probe	Art	Kern [°C]	Haltezeit [s]	Geschw. [mm/s]	Weg [mm]	Anmerkung
S.1	Strang	580	15	7	8	keine Risse
S.2	Strang	580	15	7	10	keine Risse
S.3	Strang	580	15	7	13	Risse erst sehr spät
T4	Gewalzt	600	15	7	11	Risse erkennbar
T5	Strang	605	15	7	11	Deformation, frühes Aufreißen
T6	Strang	595	15	7	11	sehr früh gerissen
T7	Gewalzt	605	15	-	11	ungültiger Versuch
T8	Gewalzt	605	20	7	11	Thermoelement verloren
T9	Gewalzt	590	20	7	12	keine Risse
T10	Gewalzt	600	20	7	12	kein Aufreißen
T11	Strang	580	20	7	11	Risse, gute Auswertbarkeit
T12	Gewalzt	605	20	7	11	nicht auswertbar
T13	Strang	580	20	7	11	zu geringer Stauchweg, kein Riss
T14	Strang	580	20	7	12	auswertbar mit Rissen
T15	Strang	580	20	7	12	Rissbildung
T16	Strang	585	20	7	12	auswertbar

Aufgrund der Ergebnisse und Erfahrungen, welche bei der ersten Versuchsserie mit der Aluminiumlegierung gewonnen werden konnten, wurde beschlossen die nächste Serie ausschließlich mit stranggepressten Material durchzuführen. Die Probe T11 wies kein perfektes Schablonenmuster auf, denn ein Teil war stochastisch mit feinen Punkten versehen. Dadurch dass sich dieser Bereich über den gesamten Stauchbereich auswerten ließ, folgte der Schluss in den zukünftigen Versuchen nur mehr ein einfach aufgesprühtes Muster zu verwenden.

Das regelmäßige Muster hatte den großen Nachteil, dass bei hohen Umformgraden die einzelnen Punkte stark verzerrt oder zueinander verschoben wurden und somit nicht mehr auswertbar waren. Auch die Größe der Punkte führt dazu, dass große Facetten zur Berechnung verwendet werden müssen, wodurch sich eine schlechte Auflösung der umgebenen Bereiche eines Risses ergibt.

In den Abb. 3.22 bis 3.26 ist der Versuch mit einem derartigen regelmäßigen Muster zu sehen. Das Aufbringen mit Schablone ist nicht trivial, da man leicht die Grundierung oder das Eisenoxidmuster zerstört. Man sieht auch, dass die Erkennung zu Beginn sehr gut ist, aber sich mit zunehmenden Umformgrad drastisch verschlechtert.

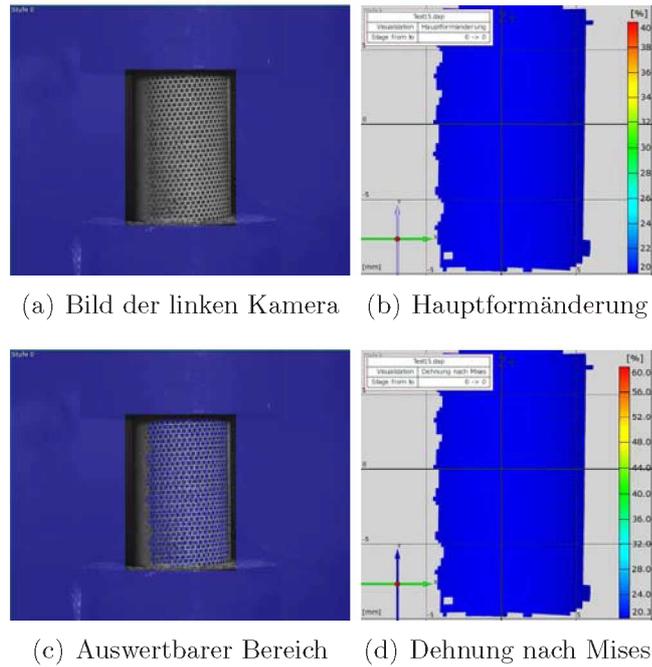


Abbildung 3.22: Auswertung des ersten Bildes zu Beginn des Stauchvorganges, Probe T15

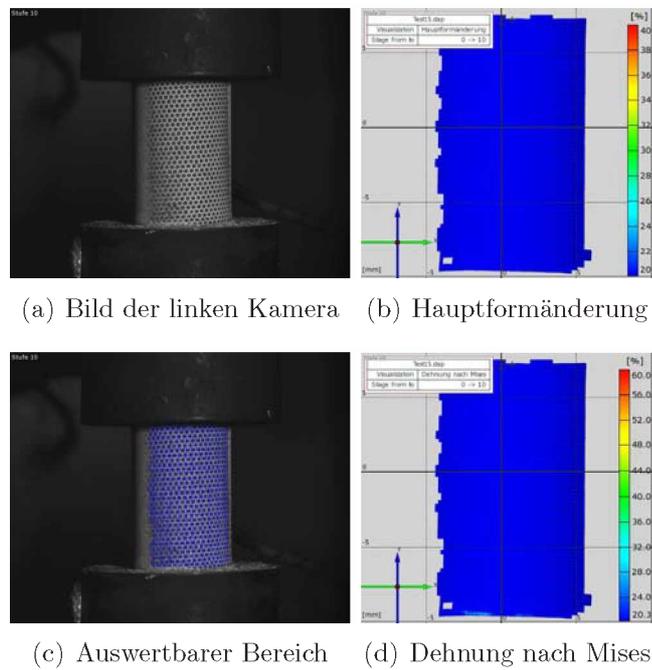


Abbildung 3.23: Auswertung der 10. Stufe, Probe T15

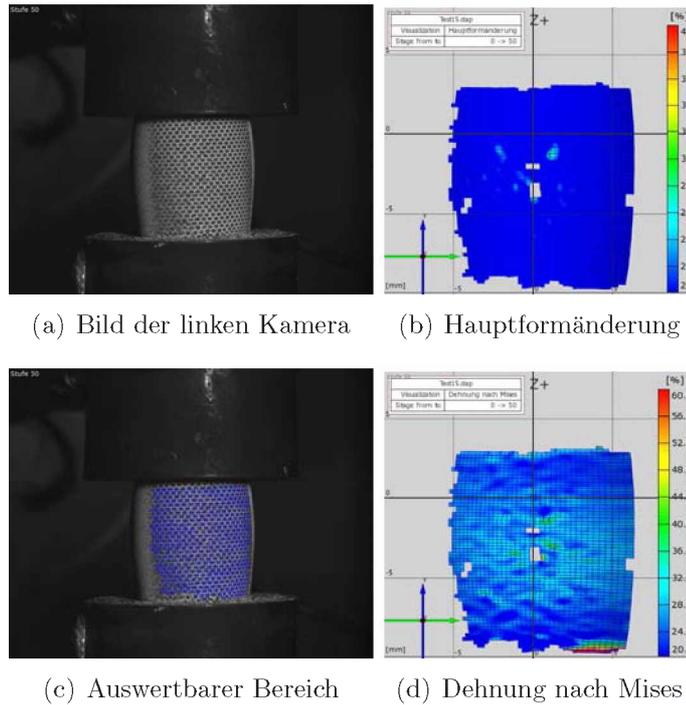


Abbildung 3.24: Auswertung der 50. Stufe, Probe T15

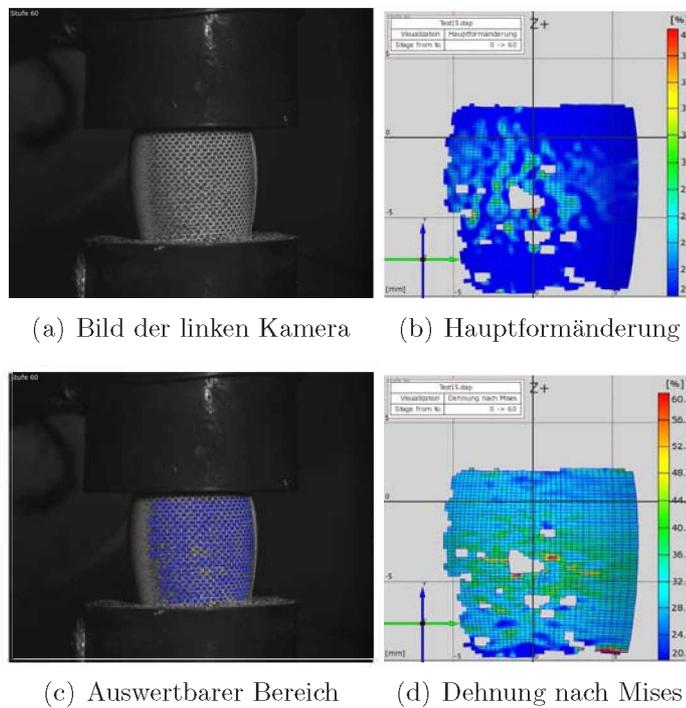


Abbildung 3.25: Auswertung der 60. Stufe, Probe T15

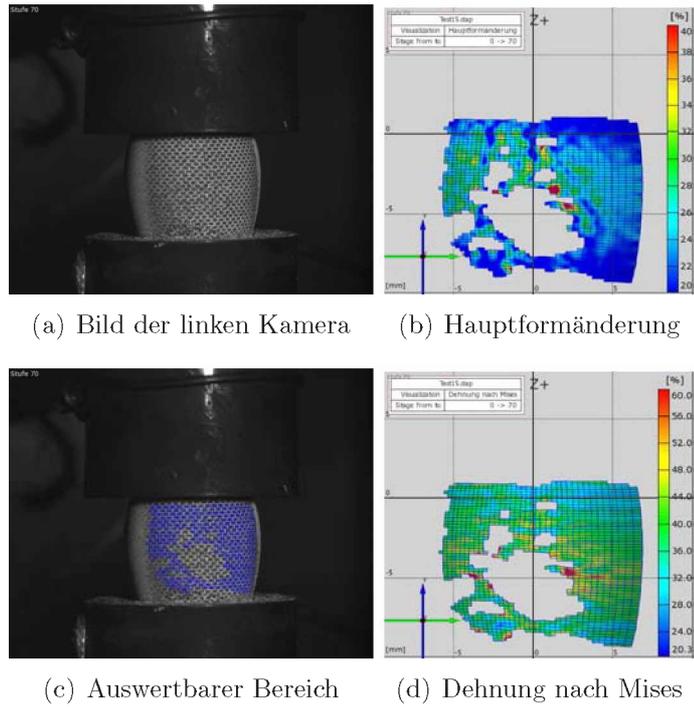
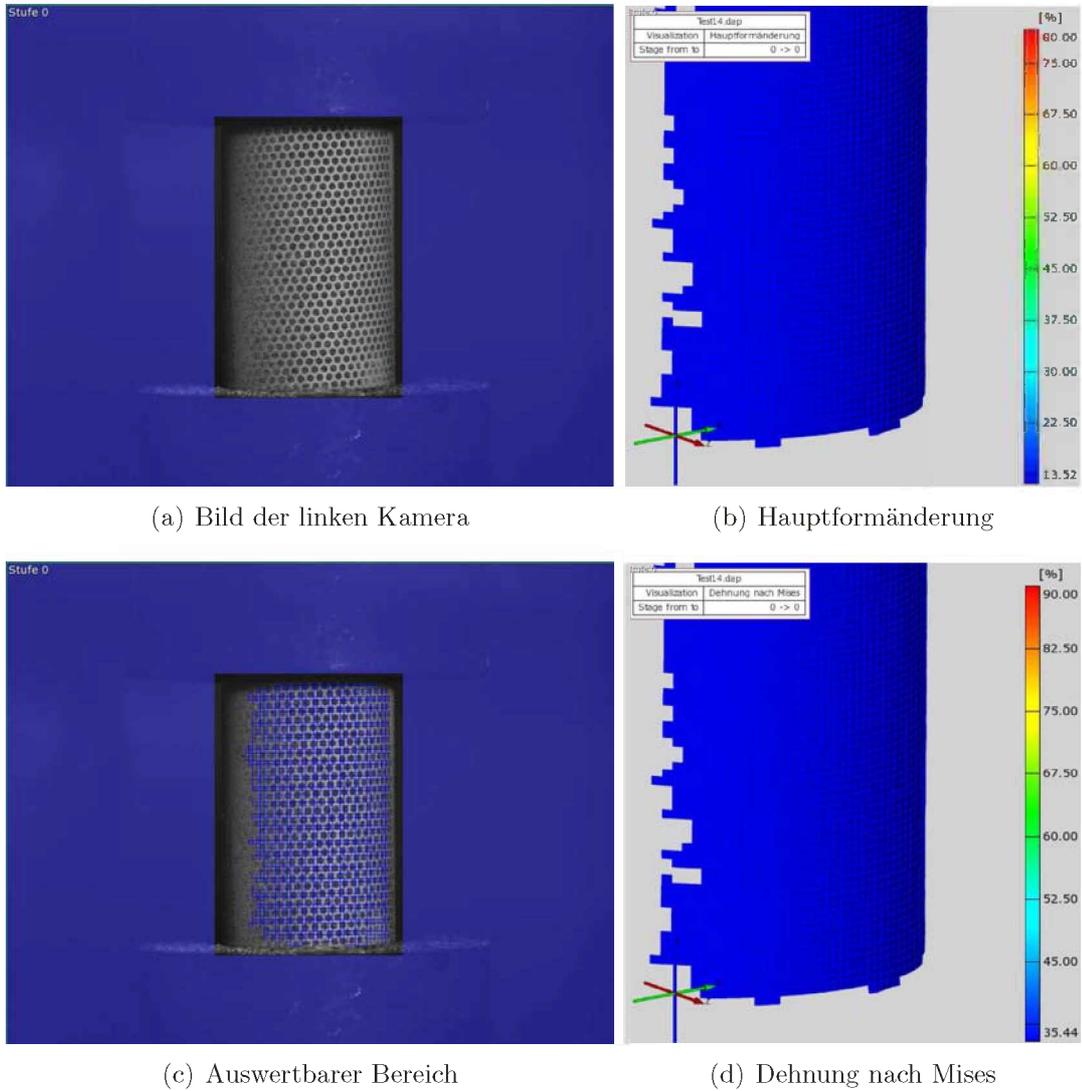


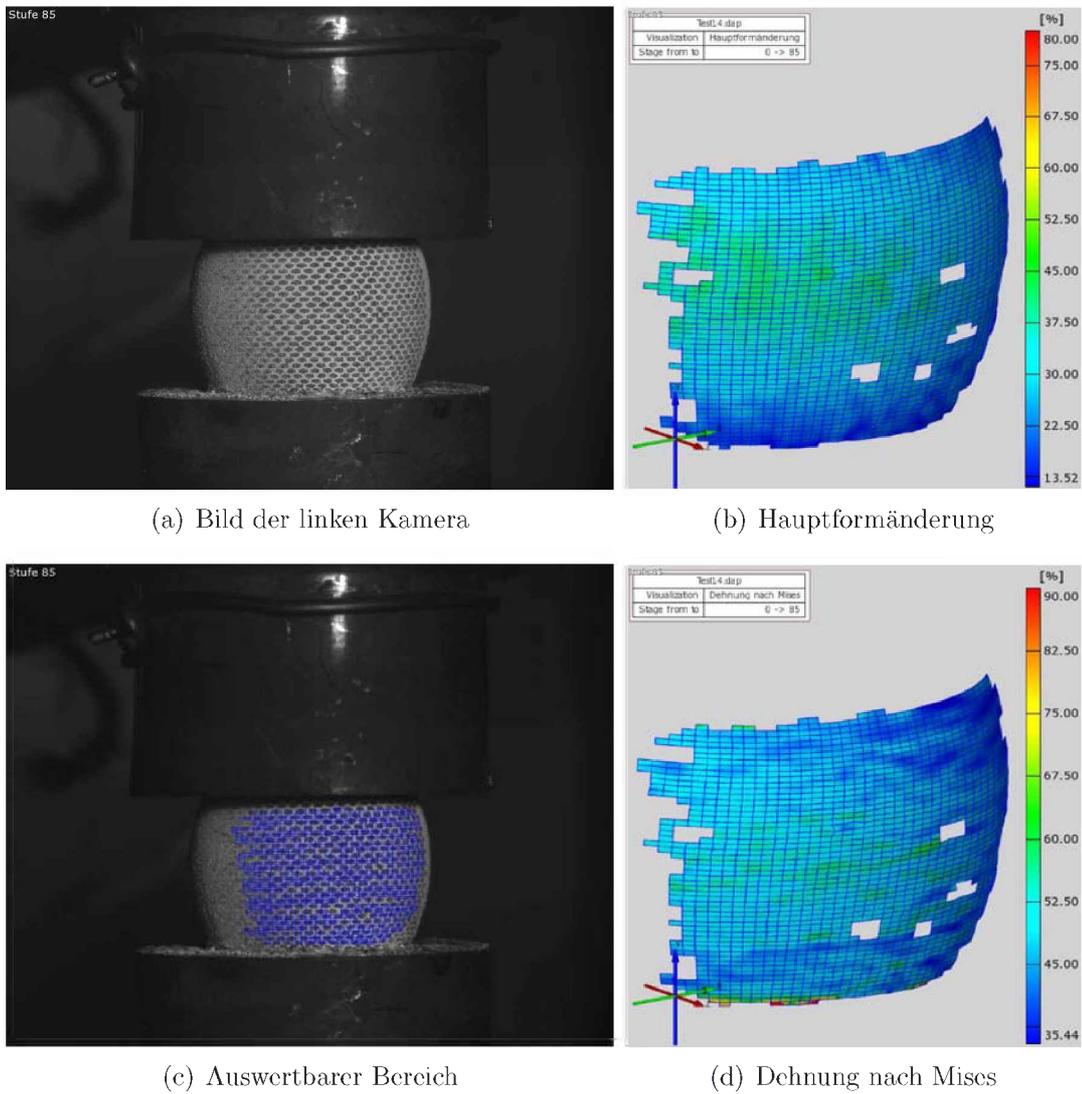
Abbildung 3.26: Auswertung der 70. Stufe, Probe T15

Im folgenden wird die Auswertung der Probe T14 mit regelmäßigem Muster gezeigt (Abb. 3.27 - 3.30).



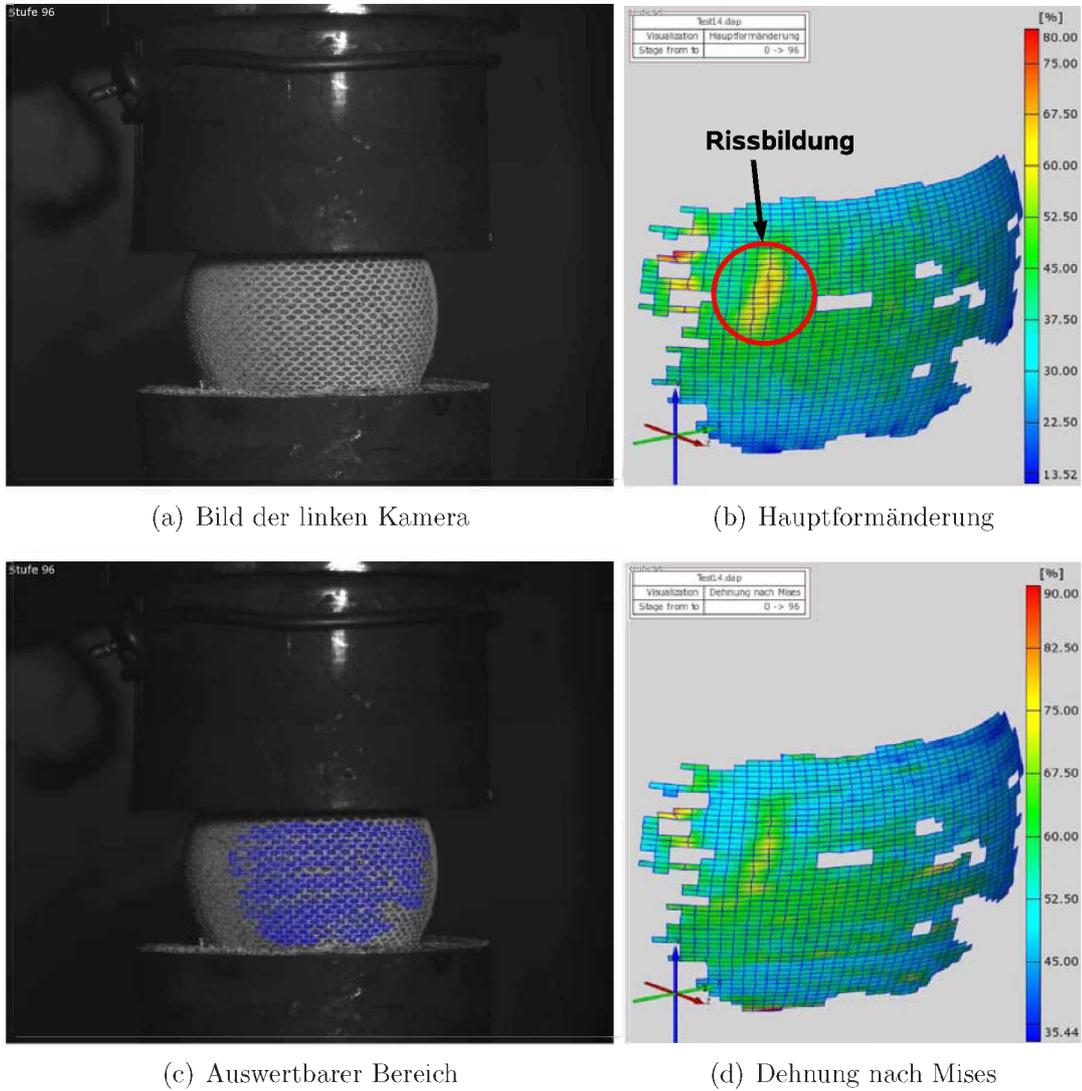
**Abbildung 3.27:** Auswertung vor Beginn des Stauchens, Probe T14

Abb. 3.28 zeigt die Probe kurz vor der Rissenstehung.



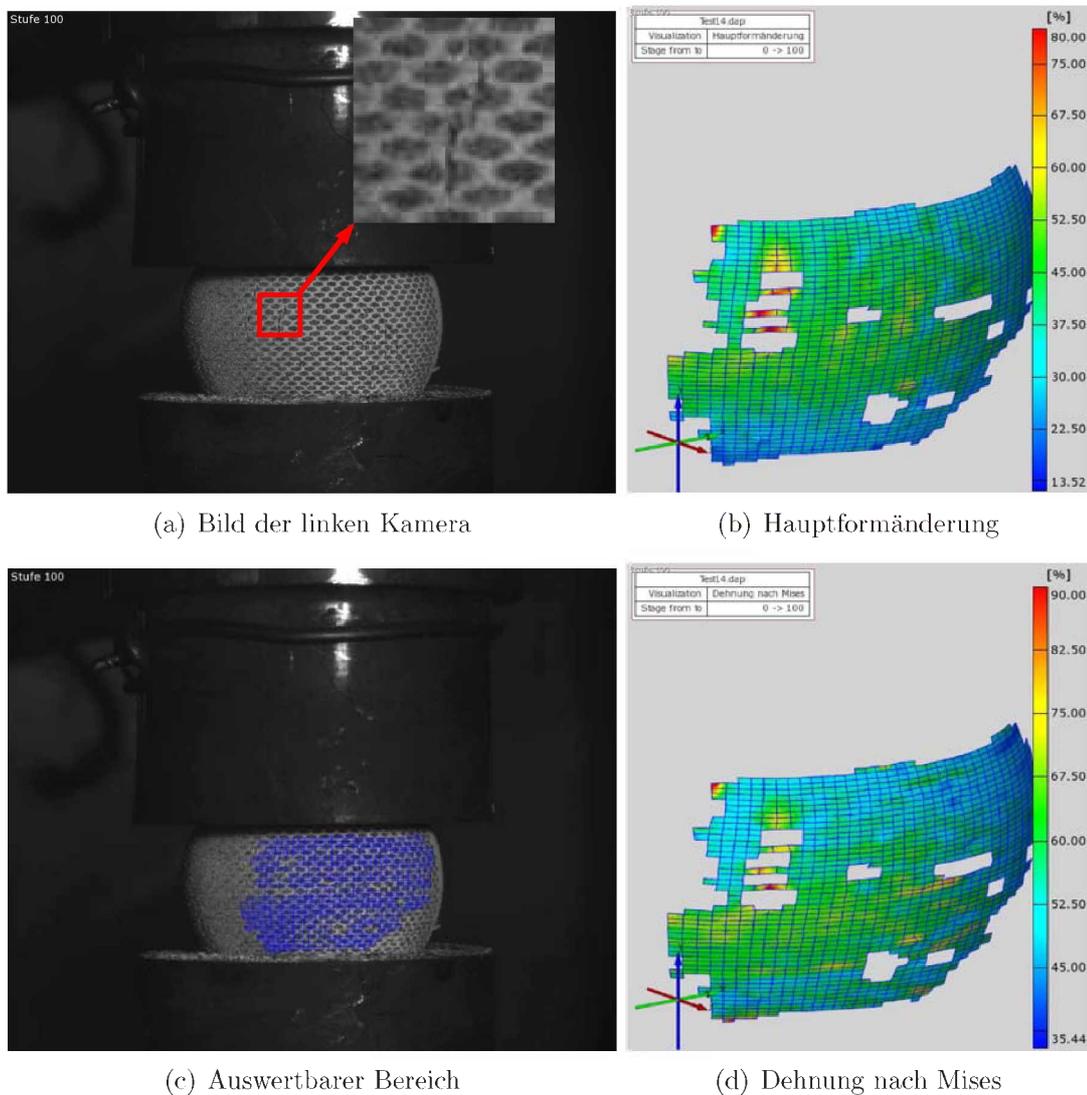
**Abbildung 3.28:** Auswertung der 85. Stufe, Probe T14

In der 96. Stufe ist der Riss bereit gut zu sehen (Abb. 3.29). Die Erhöhung der Hauptformänderung im Bereich der Rissbildung ist deutlich zu sehen



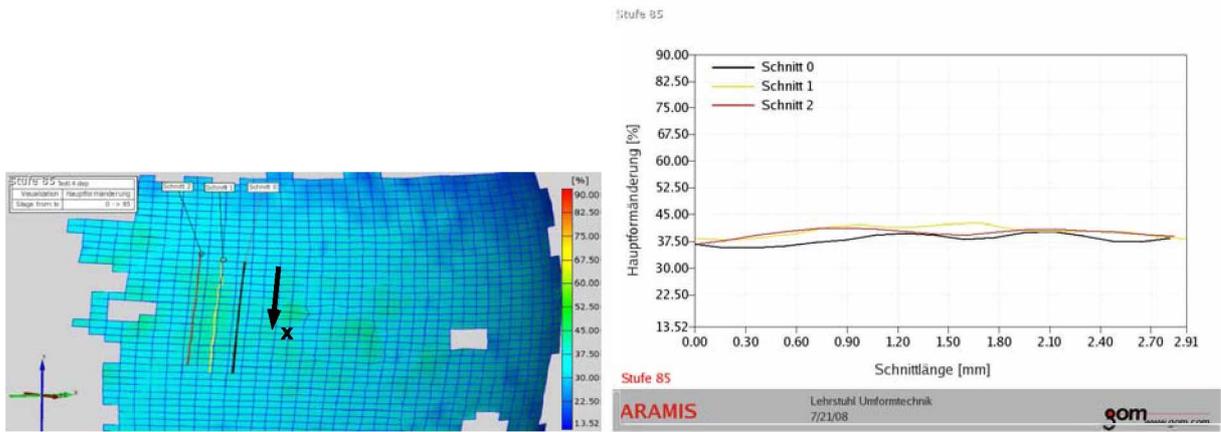
**Abbildung 3.29:** Auswertung der 96. Stufe, Probe T14

Der Riss wird größer und die Facetten in diesem Bereich können nicht mehr berechnet werden. Nur mehr der Bereich um den Riss herum ist berechenbar (Abb. 3.30).



**Abbildung 3.30:** Auswertung der 100. Stufe, Probe T14, Längsriss mit ca. 2,5mm (a)

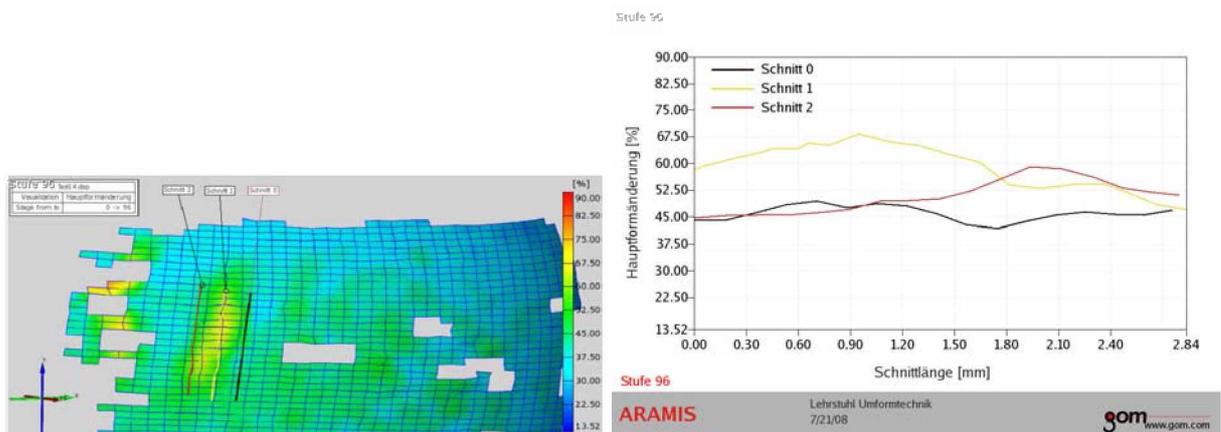
Es ist auch möglich, Auswertungen für einzelne Punkte oder Schnitte auszugeben. Im Folgenden ist eine Auswertung der Hauptformänderung in drei parallelen Schnitten für den Bereich des Risses zu sehen (Abb. 3.31 - 3.33). Dabei geht der mittlere Schnitt durch den späteren Riss und zeigt kurz vor der Rissbildung (96. Stufe) eine deutliche lokale Überhöhung der Hauptformänderung. Die äußeren zwei Schnitte befinden sich am Rand des Risses. So ist es möglich die Dehnung, Hauptformänderung etc. lokal im zeitlichen Verlauf zu verfolgen.



(a) 3D Ansicht mit Hauptformänderung

(b) Hauptformänderung über die Schnittlänge

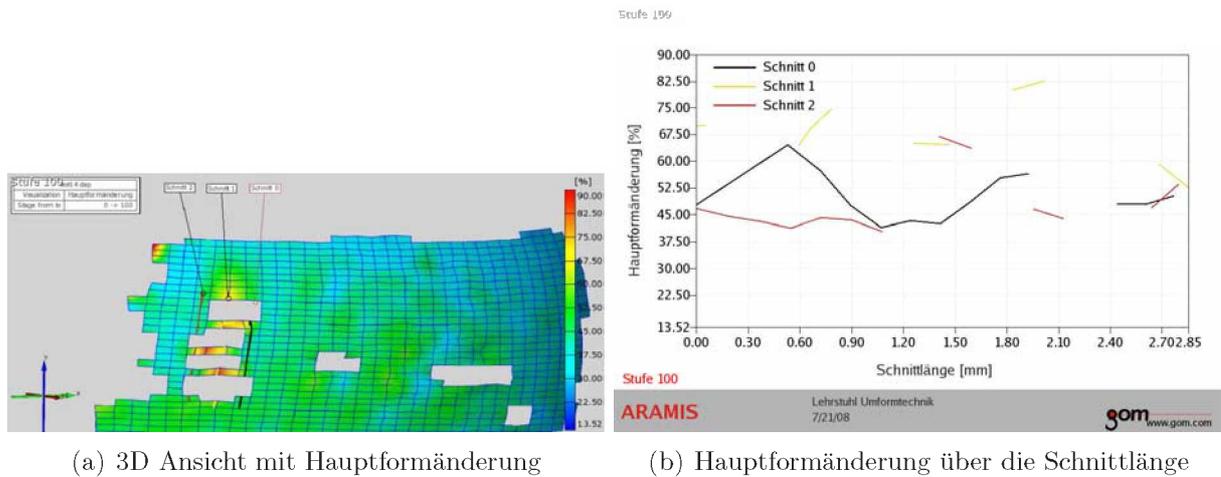
Abbildung 3.31: Auswertung der 85. Stufe für die Hauptformänderung, Probe T14



(a) 3D Ansicht mit Hauptformänderung

(b) Hauptformänderung über die Schnittlänge

Abbildung 3.32: Auswertung der 96. Stufe für die Hauptformänderung, Probe T14



(a) 3D Ansicht mit Hauptformänderung

(b) Hauptformänderung über die Schnittlänge

**Abbildung 3.33:** Auswertung der 100. Stufe für die Hauptformänderung, Probe T14

Abb. 3.34 zeigt die Probe T14 nach dem Umformvorgang. Wie bei den anderen Proben, welche in Strangrichtung gefertigt wurden, bleibt die kreisrunde Form erhalten. Zu erkennen ist auch noch der ursprüngliche Durchmesser der Probe. Die Probe ist an mehreren Stellen in Längsrichtung aufgerissen. Der gesamte Umformgrad beträgt 1,0.



(a) Probe T14 von oben

(b) Probe T14 von vorne

**Abbildung 3.34:** Probe T14 mit Längsrissen nach dem Stauchen

### 3.2.2 Versuche mit stochastischem Muster

In den folgenden Versuchen wurde das Muster stochastisch aufgetragen indem das Eisenoxid mit der Airbrush aufgesprüht wurde. Das ist auch die einfachste Methode, da man keine Schablone oder ähnliches benötigt. Die Schwierigkeit besteht darin ein relativ gleich verteiltes Punktmuster zu erhalten. Die Punkte sollten im Idealfall alle die gleiche Größe haben um ein Auswerten mit entsprechender Facettengröße zu ermöglichen.

Die Tab. 3.3 gibt kurz die zweite Versuchsserie mit stochastischem Muster wieder. Die Stauchgeschwindigkeit betrug 7mm/s, die Temperatur wurde 20 Sekunden gehalten bis gestaucht wurde. Die Versuche ergaben, dass die Proben erst ab 580°C aufzureißen begannen. Eine Aufheizen auf 590°C war insofern von Vorteil, als bei einer Abkühlung der Probe um bis zu 10°C, diese immer noch warm genug war, um Risse auszubilden. Ein häufiges Problem bestand darin, dass sich der Riss manchmal nicht im Messfeld befand. Bei einigen Versuchen kam es zudem zu einem Ablösen des Musters, dieser Effekt ist auf die länger zurückliegende Probenpräparation zurückzuführen. Möglicherweise wird das Ablösen durch Feuchtigkeit verursacht. Daher sollten die Proben entsprechend trocken gelagert werden oder erst kurz vor dem Versuch präpariert werden. Ebenso ist darauf zu achten, dass die Titanoxidschicht nicht zu stark aufgetragen wird, da es ansonsten zu einem Abplatzen bei der Verformung kommen kann. Während der Versuche gab es weiters manchmal Probleme mit dem Hubtisch, der stecken blieb. Da hier nur die grundlegende Einsatzmöglichkeit des photogrammetrischen Systems für die Rissbildungsdetektion bei der Warmumformung untersucht wurde, waren die kritischen Versuchsbedingungen nicht von essentieller Bedeutung. Für genaue und fundierte Analysen muss in Zukunft der Versuchsaufbau und -ablauf optimiert werden.

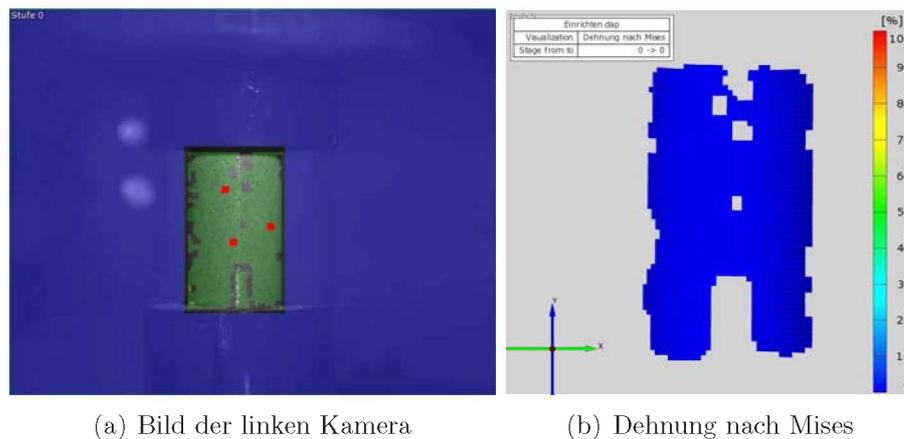
Tabelle 3.3: Zweite Versuchsserie AA6082

Probe	Kern [°C]	Weg [mm]	Anmerkung
1	580	13	Risse außerhalb
2	600	13	zu stark eingespannt
3	590	13	zu stark eingespannt
4	580	13	keine Risse
5	570	14	keine Risse
6	590	14	Risse
7	590	14	Risse
8	590	14	Risse
9	580	14	Risse
10	580	14	Risse
11	570	14	keine Risse
12	570	14	keine Risse
13	570	14	keine Risse
14	580	14	Hubtisch steckte, beim 3. Versuch Muster abgeplatzt
15	580	14	Hubtisch steckte, Muster abgeplatzt, keine Risse
16	585	14	Riss außerhalb des Bereiches
17	590	14	Riss außerhalb des Bereiches
18	590	14	Riss innerhalb des Bereiches
19	590	14	Risse Muster abgeplatzt
20	590	14	ungültig
21	590	14	Risse und Abscheren der Probe
22	585	14	Risse
23	580	14	Ablösen des Musters
24	590	14	Risse, Abscheren der Probe
25	585	14	Riss, Schub in der Probe
26	580	14	Ablösen des Musters
27	585	14	Risse außerhalb des Bereiches
28	590	14	Hubtisch versagte, 2. mal aufreißen der Probe sehr früh
29	590	14	Risse, Ablösen des Musters
30	590	14	Risse
31	560	14	keine Risse

### 3.2.2.1 Warmumformung ohne Rissbildung im auswertbaren Bereich

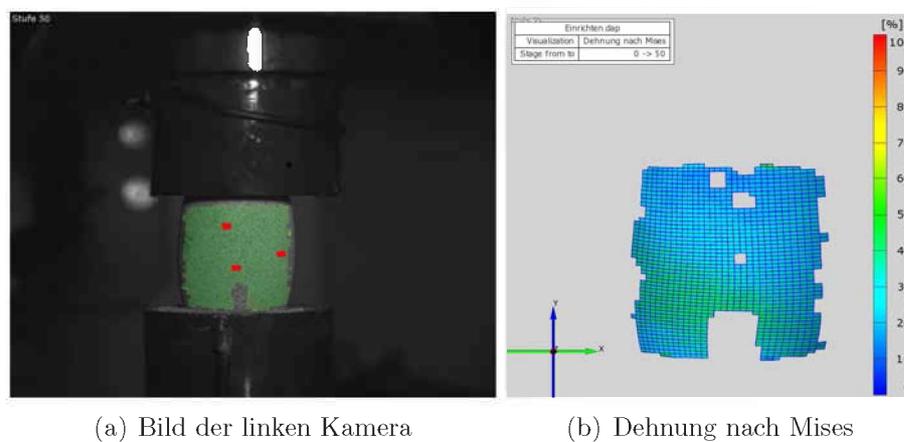
Im Folgenden sieht man einen Versuch mit der Aluminiumprobe 1 mit Grundierung und stochastischem Punktmuster. Die Zylinderstauchprobe wurde auf 580°C aufgeheizt mit einer Haltezeit von 20 Sekunden (Abb. 3.35). Zu sehen ist Abb. 3.35a die Reflexion, wel-

che die dort befindlichen Punkte für die Auswertung unbrauchbar macht. Im Zuge der Umformung und des beginnenden Ausbauchens der Probe ändert sich der Reflexionswinkel und der Lichtstreifen verschwindet. In diesem Versuch war eine Auswertung über die gesamte Umformung möglich. Aufgrund der stochastischen Mustererstellung ist es schwierig derartige Ergebnisse für jeden Versuch zu erhalten. In diesem Fall kam es zu keiner Rissentwicklung im sichtbaren Bereich. Es ist prinzipiell nicht vorherzusehen, wo ein Riss bzw. mehrere Risse auftreten werden.



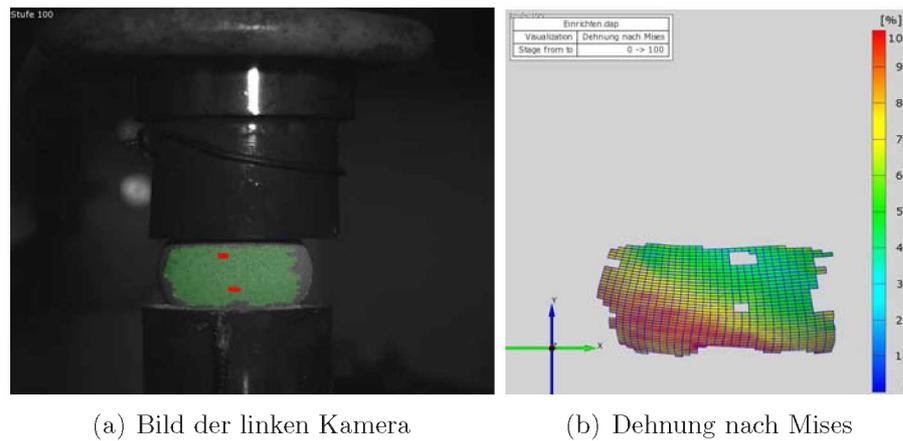
**Abbildung 3.35:** Auswertung zu Beginn des Stauchens, Probe 1

Abb. 3.36 zeigt den Versuch nach der halben Stauchzeit. Die roten Punkte sind erforderliche Startpunkte die zu Beginn der Berechnung gesetzt werden müssen. Falls ein Riss oder ein Abscheren auftritt, helfen entsprechende Startpunkte, damit die jetzt abgetrennten Bereiche berechnet werden können.



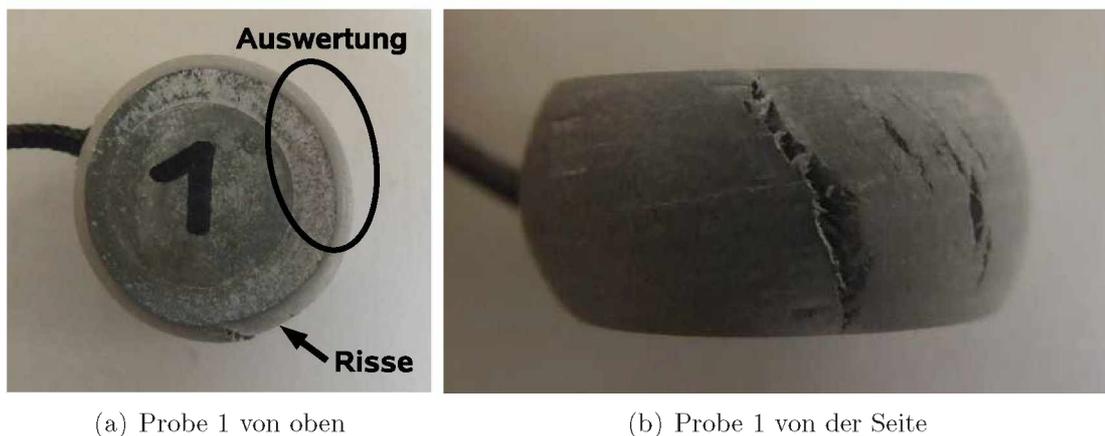
**Abbildung 3.36:** Auswertung der 50. Stufe, Probe 1

In Abb. 3.37 ist zu erkennen dass ein Startpunkt nicht mehr in dieser Stufe berechnet werden konnte, da das Muster bereit zu stark deformiert ist. Bei diesem Versuch ist ein hoher Umformgrad erreicht worden. In dem auswertbaren Bereich entstand kein Riss, jedoch an anderer, für die Kameras nicht sichtbar, Stelle. In der Dehnungsverteilung nach Mises ist eine inhomogene Verformung zu erkennen (Abb. 3.37b).



**Abbildung 3.37:** Auswertung der 100. Stufe, Probe 1

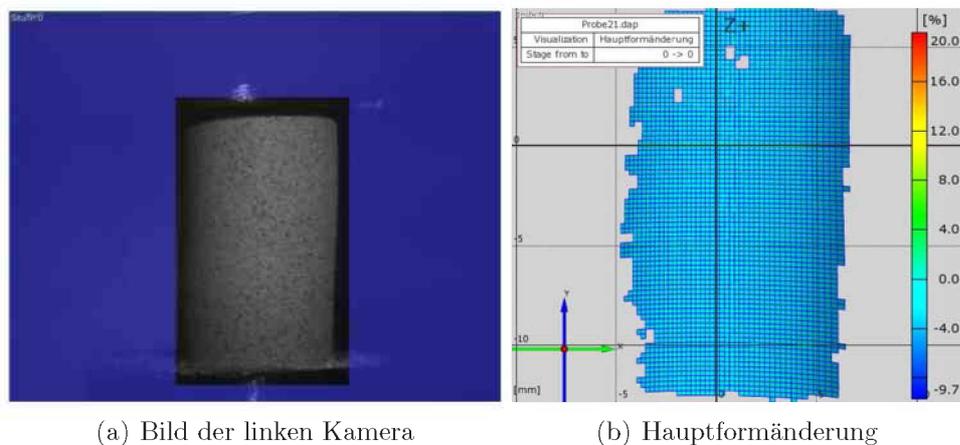
In Abb. 3.38 ist die Probe 1 nach dem Stauchen (Gesamtumformgrad  $\varphi = -0,83$ ) zu sehen, sowie die Risse im nicht auswertbaren Bereich.



**Abbildung 3.38:** Probe 1 nach dem Stauchen

### 3.2.2.2 Warmumformung mit Rissbildung im auswertbaren Bereich

Das Ziel der Experimente war es zu ergründen, ob die Photogrammetrie geeignet ist, die lokalen Dehnungen und auch die Rissinitiierung zu bestimmen. In den folgenden Aufnahmen ist die Entstehung eines Risses dokumentiert. Die in Abb. 3.39 zu sehende Probe 21 wurde auf 590°C erhitzt und 20 Sekunden bei dieser Temperatur gehalten. Die Probe wird durch die Einspannung bereits belastet, was sich in einer eingebrachten Verformung zu Beginn des Stauchvorganges zeigt.



**Abbildung 3.39:** Auswertung zu Beginn des Stauchens, Probe 21

In Abb. 3.40 ist der Verlauf des Stauchens zur Zeit des Entstehens und Ausbildens eines Risses zu sehen. Der Ort des Risses kann an der Hauptformänderungsverteilung erkannt werden. Sobald der Riss an der Oberfläche auftritt, können die dort befindlichen Facetten nicht mehr berechnet werden. Nur die umgebenden Facetten sind weiter auswertbar. Die Dehnungs- und die Verschiebungsverteilung können kurz vor Erscheinen des Risses bestimmt werden und so ein Kriterium liefern, ab wann nun eine Schädigung auftritt. Mit mehreren Versuchen könnten mit solchen Daten Verformungskarten (Processing Maps) erstellt bzw. ein Schädigungskriterium definiert werden, um die Verformbarkeit eines Materials bei variablen Prozessbedingungen zu charakterisieren. In der Hauptformänderungsverteilung zeigt sich außerdem die Bildung eines Scherbandes.

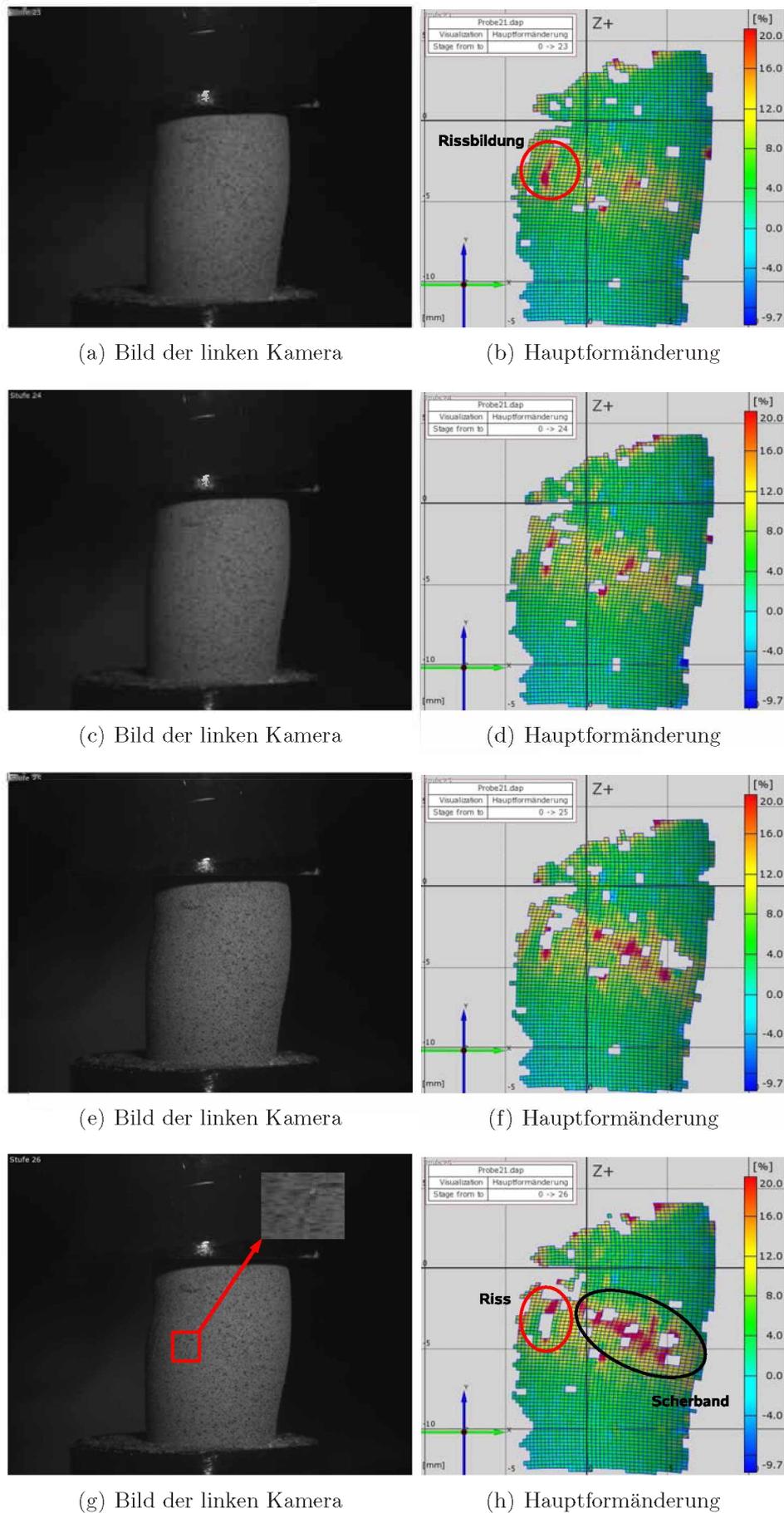
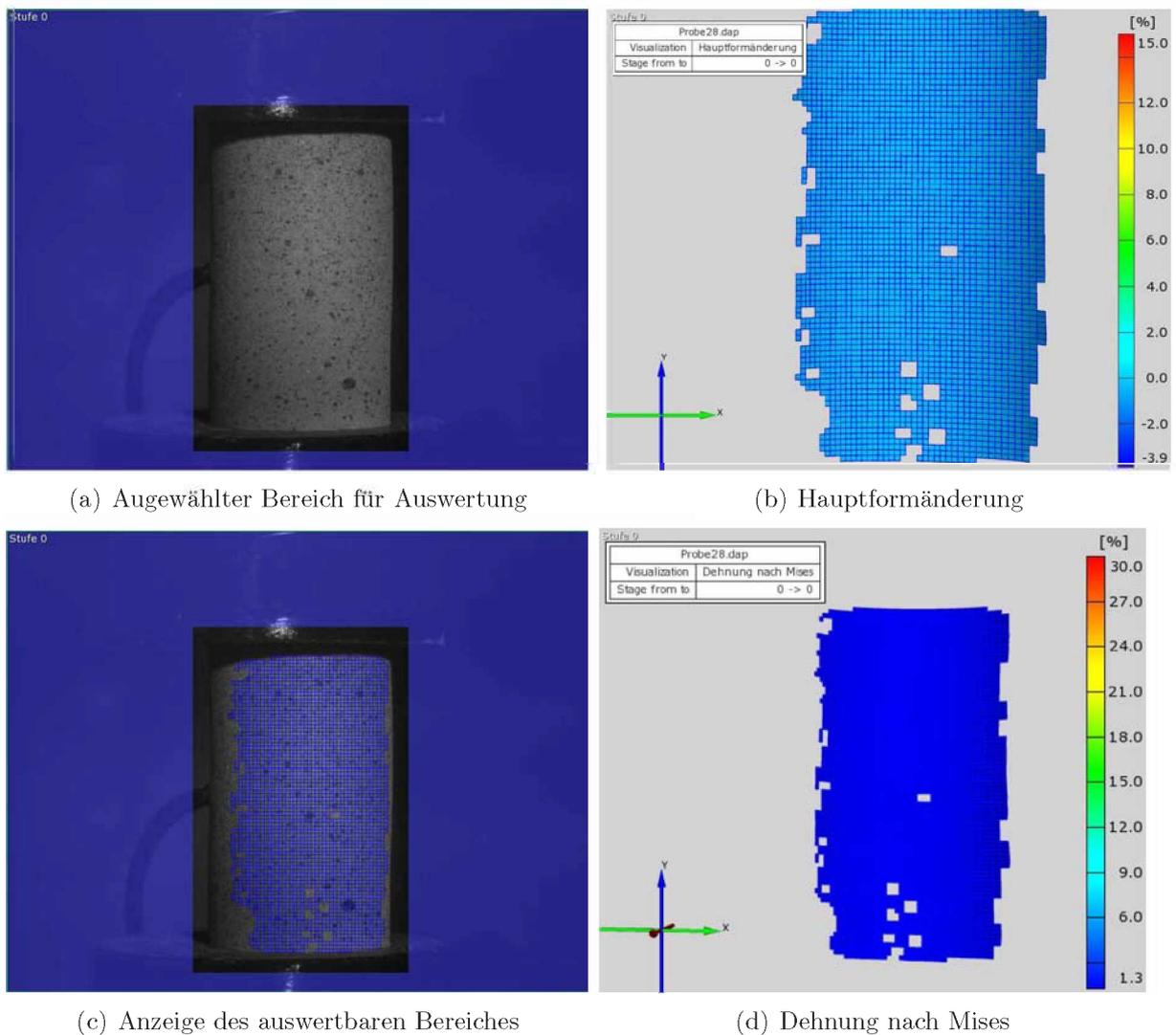


Abbildung 3.40: Auswertung der 23. bis 26. Stufe, Probe 21

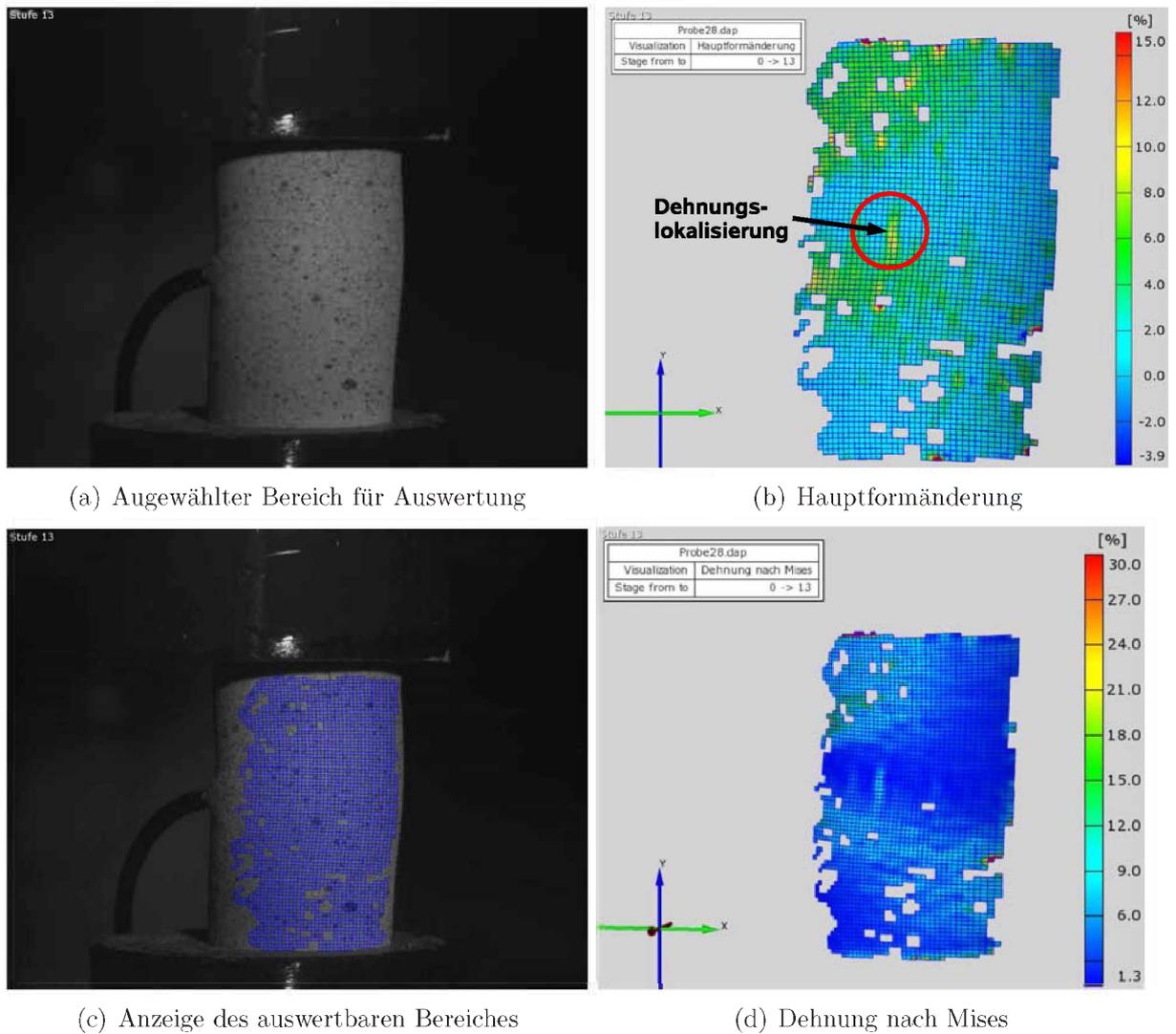
In einem weiteren Versuch wurde eine entsprechend präparierte Probe 28 mit feinem Muster bis auf 580°C induktiv aufgeheizt und anschließend gestaucht. Nach Ablauf der 20 Sekunden Haltezeit schaltet sich der Induktor ab und die Presse startet den Verformungsprozess, nachdem der Hubtisch die obere Position erreicht hat. Bei dem Start der Presse wird die Bildeaufnahme manuell gestartet.

In Abb. 3.41 sieht man eine Analyse der aufgenommenen Bilder zu Beginn des Stauchvorganges. Es wird der Bereich markiert auf den die Berechnung beschränkt werden soll. Danach werden Startpunkte definiert und anschließend die Auswertung durchgeführt.



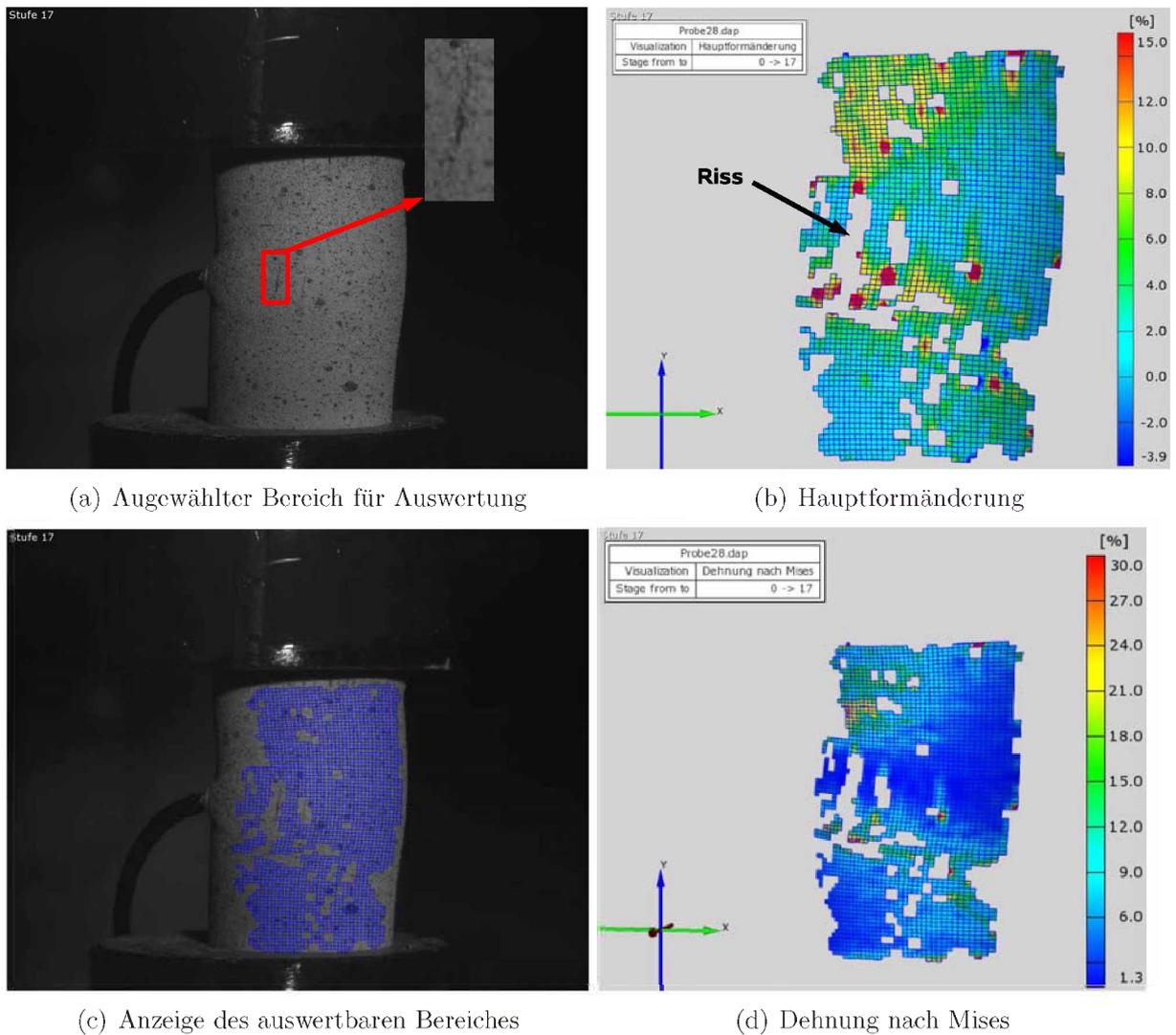
**Abbildung 3.41:** Auswertung des ersten Bildes zu Beginn des Stauchvorganges, Probe 28

In Abb. 3.42 kann man an an der Hauptformänderungs- sowie der Dehnungsverteilung nach Mises die Stelle erkennen, an der sich der Riss entwickeln wird.



**Abbildung 3.42:** Kurz vor Entstehung der Risse, Probe 28

Bei der Probe 28 treten mehrere Risse auf. In Abb. 3.43 ist einer dieser Risse im Detail zu sehen.



**Abbildung 3.43:** Risse in Probe 28, 17. Stufe

Die Abb. 3.44 zeigt die Probe 28 nach dem Stauchen. Sehr gut sind die einzelnen Längsrisse mit faseriger Struktur zu sehen, sowie die runde Form die für die Proben mit Achsrichtung in Strangpressrichtung typisch ist (Gesamtumformgrad  $\varphi = -1,11$ ).



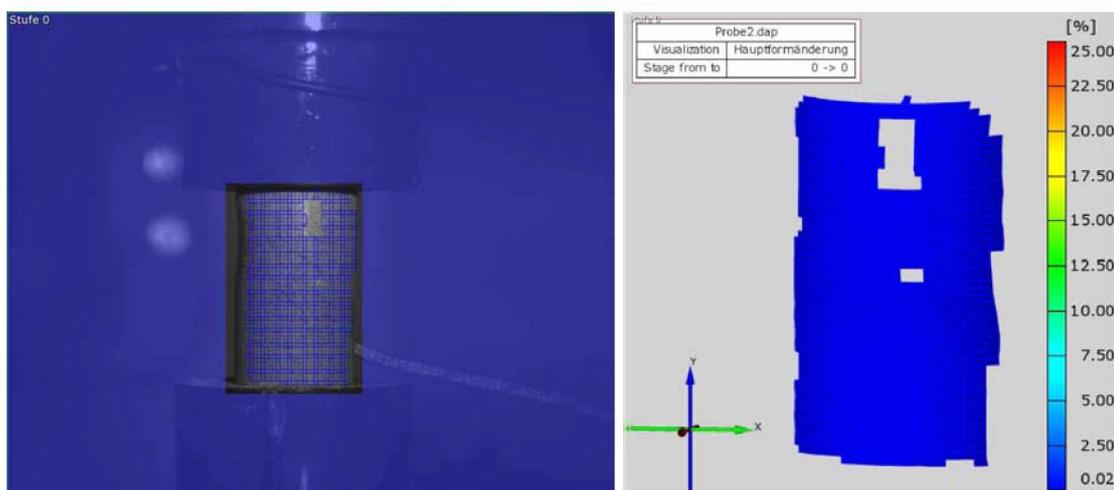
(a) Probe 28 von oben

(b) Probe 28 von der Seite

**Abbildung 3.44:** Probe 28 nach dem Stauchen

### 3.2.2.3 Untersuchung mit globalen Abscheren der Probe und Rissbildung

Die Versuchsprobe 2 wurde auf 600°C mittels Induktors erhitzt und nach 20 Sekunden Haltezeit gestaucht. Zu erkennen ist bereits eine Deformation noch bevor sich der Stempel nach unten bewegt (Abb. 3.45). Diese Verformung wird durch die Wärmeausdehnung bei der hohen Temperatur und der Einspannung zwischen den beiden Pressstempeln verursacht. Ein druckfreies Einsetzen der Probe ist nicht möglich, da das Thermoelement die Probe verschieben würde. Es ist zwar möglich, etwas Spiel mit dem Oberstempel einzubringen, das kann aber dazu führen, dass sich der Stempel beim Stauchen verdreht und somit zusätzliche Spannungen induziert werden.

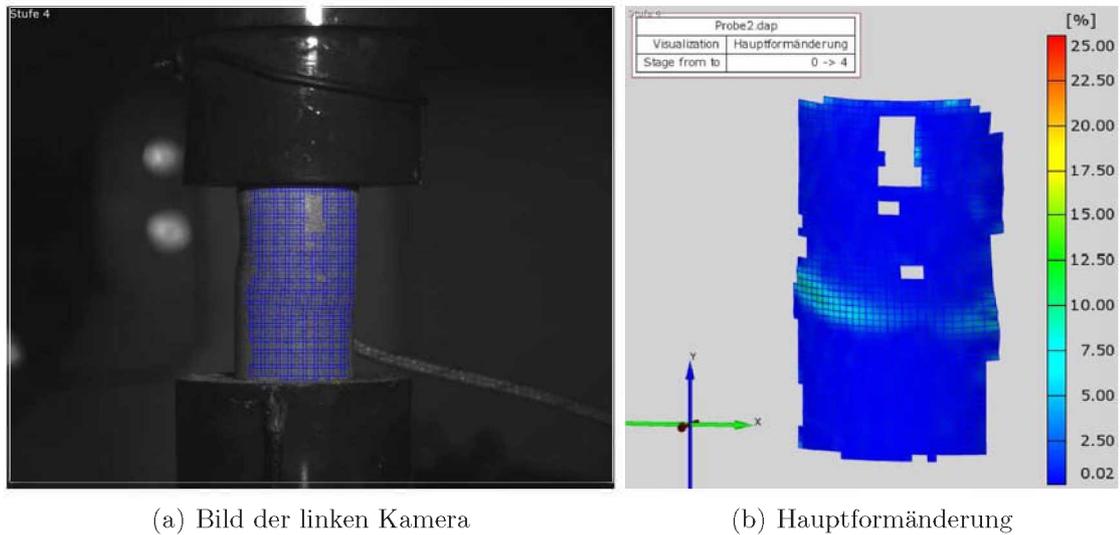


(a) Bild der linken Kamera

(b) Hauptformänderung

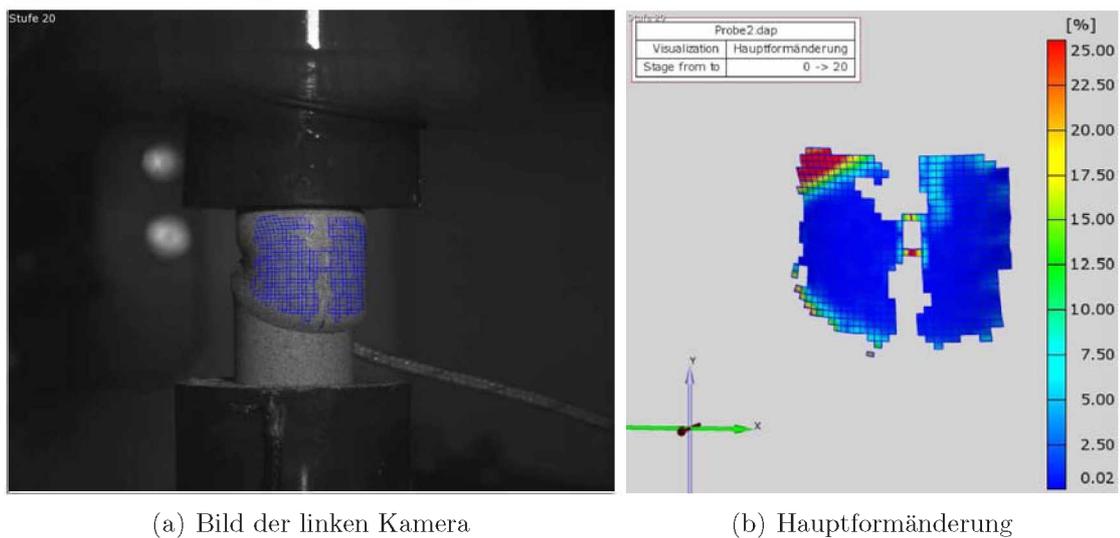
**Abbildung 3.45:** Auswertung zu Beginn der Umformung, Probe 2

Beim Stauchen ist bereits zu Beginn ein Abscheren der Probe zu erkennen und zwar optisch an der Probe und an der berechneten Hauptformänderungsverteilung (Abb. 3.46)



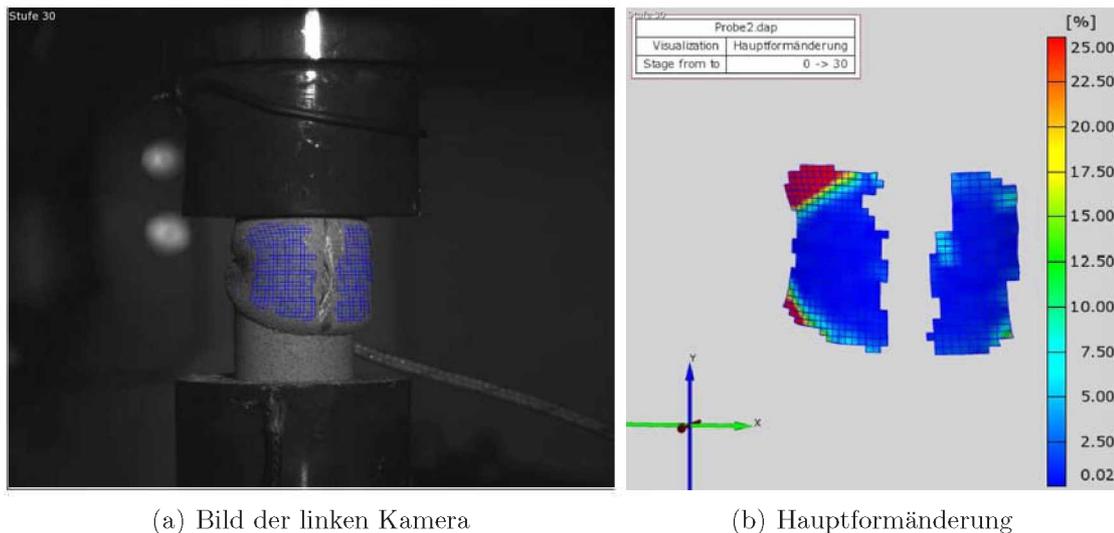
**Abbildung 3.46:** Auswertung der 4. Stufe, Probe 2

In der Abb. 3.47 ist zu sehen dass an der Stelle, an der sich ein Riss entwickelt, sowie im gesamten Bereich der abgesicherten unteren Probenhälfte die Facetten nicht mehr berechnet werden können.



**Abbildung 3.47:** Auswertung der 20. Stufe, Probe 2

In Abb. 3.48 ist der Längsriss deutlich zu erkennen. Durch Risse und Abscherungen werden Bereiche abgetrennt, damit diese ebenfalls weiterhin ausgewertet werden, müssen dort Startpunkte gesetzt werden. In diesem Fall ist im unteren Bereich kein zusätzlicher Startpunkt gesetzt worden, daher konnte der untere Bereich in weiterer Folge nicht von der Software berechnet werden.



**Abbildung 3.48:** Auswertung der 20. Stufe, Probe 2

### 3.2.2.4 Versuche mit Proben, senkrecht orientiert zur Strangpressrichtung

Die Tab. 3.4 gibt die Versuche mit Proben, die normal zur Strangpressrichtung gefertigt wurden wieder. Man erkennt das Schmiedekreuz im Rissverlauf wieder und die Anisotropie der Verformbarkeit zeigt sich durch eine elliptische Form der gestauchten Zylinderproben (Abb. 3.49). Die Probe N03 zeigt eine runde Form und die typischen Risse der Proben, welche in Strangpressrichtung gefertigt wurden. Leider waren die entstehenden Risse nie im Bereich der Auswertung.

Tabelle 3.4: Dritte Versuchsserie AA6082

Probe	Kern [°C]	Weg [mm]	Anmerkung
N01	590	14	Risse
N02	580	14	Risse außerhalb des Bereiches
N03	590	14	ungültig
N04	590	14	Hubtisch defekt
N05	590	14	Risse außerhalb des Bereiches



(a) Probe N01 von oben

(b) Probe N01 von der Seite

Abbildung 3.49: Die Probe N01 nach dem Stauchen

Die Abb. 3.50 zeigt als Überblick die Proben der zweiten und dritten Versuchsserie nach dem Stauchen.

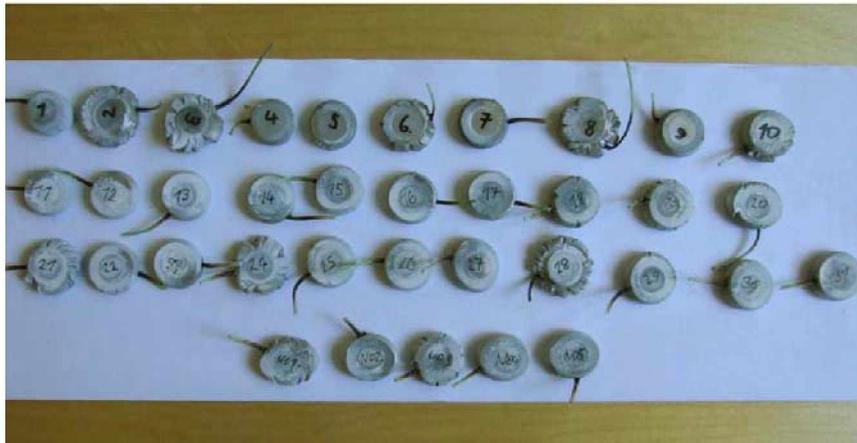


Abbildung 3.50: Versuchsserie 2 und 3

## 4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Der Inhalt dieser Arbeit war es zu ermitteln ob die Technik der Photogrammetrie bei der Untersuchung von lokalen Verformungen und der Rissinitierung bei der Warmumformung einsetzbar ist. Die Photogrammetrie findet in vielen Bereichen Anwendung. Mit ihrer Hilfe können z.B. Maschinen und ihre Verformung betrachtet werden oder die Dehnungen einer Schweißverbindung bei einem Zugversuch. Die meisten Anwendungen haben eines gemeinsam, sie finden in der Regel bei Raumtemperatur statt. Der Vorteil ist, dass dadurch nur die Materialeigenschaften bei einer Temperatur erforderlich sind und somit sehr leicht aus den Dehnungen die entsprechenden Spannungen berechnet werden können.

Nun soll aber versucht werden ein optisches System, zudem die Photogrammetrie gehört, bei hohen Temperaturen eingesetzt werden kann. Dazu müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein:

- Der Blick auf das zu vermessende Objekt muss für die Kameras frei sein
- Die Oberfläche muss eine von der Software auswertbare Struktur aufweisen
- Die Beleuchtung muss den Erfordernissen angepaßt werden
- Der Werkstoff darf nicht stark verzundern

Zu diesen Voraussetzungen kommen noch weitere Faktoren hinzu, die Einfluss auf die Einsatzmöglichkeiten haben. Die hohen Temperaturen führen dazu, dass nicht ohne weiteres der Spannungszustand berechnet werden kann, da die Materialeigenschaften temperaturabhängig sind. Für die Verarbeitung der aufgenommenen Bilder ist eine Oberflächenstruktur notwendig und diese ist nicht immer bereits von vornherein gegeben, daher ist es erforderlich eine entsprechende Struktur bzw. Muster aufzubringen. Bei Untersuchungen bei Raumtemperatur kann man mit Sprühlacken und Ätzungen regelmäßige oder stochastische Strukturen aufbringen, bei hohen Temperaturen ist dies nicht immer gewährleistet. In den hier gezeigten Versuchen wurde auf bereits Erprobtes aus Vorversuchen zurückgegriffen. Für die Erzeugung von Mustern hat sich Titanoxid bewährt, da es bei hohen Temperaturen keine Reaktion mit den Proben einging und sich selbst meist nur gelb verfärbte. Ein Problem, das besonders bei runden Proben auftritt, ist die Reflexion des Lichts, welche dazu führt, dass Bereiche nicht mehr erfasst werden können. Um diesem Umstand entgegenwirken zu können, wurden die Proben mit Titanoxid grundiert und ein Muster mit Eisen(III)oxid aufgebracht. Für diese Arbeiten hat sich eine einfache Airbrush als sehr gutes Werkzeug erwiesen. Das Muster selbst kann stochastisch oder auch regelmäßig sein. Der Vorteil einer stochastischen Struktur ist die einfachere Auftragung.

Bei der Aufnahme der Bilder mit den beiden Kameras sind einige Parameter von unterschiedlicher Bedeutung, insbesondere dadurch, dass sich diese auch sehr stark gegenseitig beeinflussen. Bei hoher Umformgeschwindigkeit ist eine hohe Aufnahmefrequenz erforderlich, wodurch die Belichtungszeit sinkt und mehr Licht benötigt wird. Mehr Licht auf den Sensor der Kamera gelangt dann, wenn die Blende weiter geöffnet ist. Durch das Öffnen der Blende reduziert sich jedoch die Tiefenschärfe, was bei stark ausbauchenden Proben zu unscharfen Aufnahmen führt.

Es zeigte sich, dass der Versuchsaufbau in Zukunft zu verbessern ist. Die Proben müssen erwärmt und nach einer Haltezeit gestaucht werden, wobei beim Stauchen der Blick auf die Proben nicht behindert werden darf. Hier wurde das Aufheizen mit einem Induktor und einem Hubtisch umgesetzt. Der Aufbau ist insofern ungünstig, als damit keine isotherme Umformung möglich ist. Ein Induktor mit Spule verursacht immer ein ungleichmäßiges Erwärmen der Probe und der Stempel. Auf diese Problematik wurde in einer Dissertation ausführlich eingegangen [19]. Die Stirnflächen der Proben wurden nicht geschmiert, um ein möglichst großes Ausbauchen mit entsprechenden Zugspannungen in Umfangsrichtung, die eine Rissinitiierung erleichtern sollen, zu erzielen. Um das Festkleben zwischen Probe und Werkzeug zu verhindern, wurde auf die Stirnflächen Titanoxid aufgebracht, wodurch sich die Proben leicht lösen ließen. Bei der Präparation der Proben zeigte sich weiter, dass es besser ist, diese erst kurz vor den Versuchen zu beschichten und das Muster aufzutragen. Durch eine Aufnahme von Feuchtigkeit löste sich die Titanoxidschicht bei der Umformung und eine Auswertung war nicht mehr möglich. Die Dicke der Grundierung sollte so stark sein, dass kaum metallischer Glanz sichtbar ist, zu große Schichtdicken führen zu einer Ablösung während der Verformung.

Die Versuche haben gezeigt, dass mit Hilfe der Photogrammetrie die lokale Verformungsverteilung und auch die Rissinitiierung betrachtet werden kann. Das System kann nur Oberflächendehnungen vermessen, daher ist der Riss selber nur in indirekter Weise analysierbar. Man erkennt an der Dehnungsverteilung eine Rissbildung und man kann die Dehnungen in der Umgebung des Risses analysieren. Aber nicht nur diese Daten stehen zur Verfügung, auch Betrachtungen des gesamten Umformvorganges sind möglich. So ist etwa die Bewegung des Werkzeuges darstellbar, und damit eingebrachte Schubbelastungen durch unsymmetrisches Fluchten des Werkzeug-Werkstück-Systems. Alle diese Ergebnisse können helfen, ein Simulationsmodell zu optimieren und machen die daraus erhaltenen Ergebnisse mit der Wirklichkeit vergleichbar.

Mit Hilfe der Photogrammetrie ist es somit möglich bei der Warmumformung Informationen zu:

- Verschiebung und Rotation
- aktuelle Dehnungen, akkumulierte Verformungen
- Spannungen
- Verformunglokalisierungen und dadurch indirekt der Beginn einer makroskopischen

Materialschädigung:

- lokale Rissbildung
- globale Abscherungen

für das Werkstück zu erhalten und die gemessenen Daten für Optimierungen im Umformprozess selbst oder für allfällige FE-Simulationen zu verwenden. Daneben ist auch die Betrachtung der Werkzeuge hinsichtlich der:

- elastische Dehnungen
- Bewegungen

möglich. Damit ist der Umformprozess mit Werkstück und Werkzeug im Ganzen betrachtbar.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	15x15-Facetten mit 2 Pixel Überlappung . . . . .	5
1.2	Verschiebung der Facette . . . . .	5
1.3	Verformung eines Einheitsquadrates . . . . .	6
1.4	Definition Scherwinkel . . . . .	7
1.5	Definition des Koordinatensystems . . . . .	8
1.6	Definition des verformten lokalen Koordinatensystems . . . . .	10
1.7	Definition des unverformten lokalen Koordinatensystems . . . . .	11
1.8	4er-Facette mit Umgebungspunkten . . . . .	12
1.9	Spaltzugversuch an einem Verbundkörper [9] . . . . .	14
1.10	Einsatz von ARAMIS in der Bruchmechanik [6] . . . . .	15
1.11	Nakazima Test . . . . .	16
1.12	Diagrammetrische Ausrichtung der Kameras . . . . .	17
1.13	Intensitätsbeschreibung . . . . .	17
1.14	Auswertung des Nakazima Tests [15] . . . . .	18
1.15	Formänderungskurve . . . . .	18
2.1	Orientierung der Proben, gefertigt aus dem stranggepressten Stangenmaterial	26
2.2	Querschliff normal auf die Strangpressrichtung von Probe S1 und S2 . . . .	26
2.3	Querschliff in Strangpressrichtung von Probe S4 und S5 . . . . .	27
2.4	Orientierung der Probe M1 im Strang . . . . .	27
2.5	Metallographische Auswertung der Proben M1 . . . . .	28
2.6	Aufbau-Udimet720 . . . . .	29
2.7	Versuchsaufbau 1MN . . . . .	29
2.8	Beleuchtung . . . . .	30
2.9	Überhitzte Probe . . . . .	31

---

2.10	Der Hubtisch mit Induktor . . . . .	32
2.11	Abspannen der Spule . . . . .	33
2.12	Udimet720-Kragenprobe . . . . .	35
2.13	Airbrush von Revell . . . . .	36
2.14	Reihenfolge der Probenpräparation . . . . .	36
2.15	Muster auf Probe . . . . .	37
2.16	Ablösen der Titanoxidschicht . . . . .	37
3.1	Stauchversuch der Probe 1.2 auf der Servotest . . . . .	39
3.2	Probe 5.1 . . . . .	40
3.3	Kragenprobe . . . . .	40
3.4	Auswertung des ersten Bildes zu Beginn des Stauchvorganges, Probe 1.2 . . . . .	41
3.5	Auswertung der 10. Stufe, Probe 1.2 . . . . .	42
3.6	Auswertung der 20. Stufe, Probe 1.2 . . . . .	42
3.7	Auswertung der 30. Stufe, Probe 1.2 . . . . .	43
3.8	Auswertung der 40. Stufe, Probe 1.2 . . . . .	43
3.9	Auswertung der 50. Stufe, Probe 1.2 . . . . .	44
3.10	Auswertung der 60. Stufe, Probe 1.2 . . . . .	44
3.11	Auswertung der 70. Stufe . . . . .	45
3.12	Auswertung der nullten Stufe, Probe 7.2 . . . . .	46
3.13	Auswertung der 10. Stufe, Probe 7.2 . . . . .	46
3.14	Auswertung der 20. Stufe, Probe 7.2 . . . . .	47
3.15	Auswertung der 30. Stufe, Probe 7.2 . . . . .	47
3.16	Auswertung der 40. Stufe, Probe 7.2 . . . . .	48
3.17	Auswertung der 50. Stufe, Probe 7.2 . . . . .	48
3.18	Auswertung der 60. Stufe, Probe 7.2 . . . . .	49
3.19	Auswertung der 70. Stufe, Probe 7.2 . . . . .	49
3.20	Scherwinkel zu Beginn (a,b) und in der 70. Stufe (c,d) für Probe 7.2 . . . . .	50

---

3.21	Bewegung des Oberstempels der Servotest . . . . .	51
3.22	Auswertung des ersten Bildes zu Beginn des Stauchvorganges, Probe T15 . . . . .	54
3.23	Auswertung der 10. Stufe, Probe T15 . . . . .	54
3.24	Auswertung der 50. Stufe, Probe T15 . . . . .	55
3.25	Auswertung der 60. Stufe, Probe T15 . . . . .	55
3.26	Auswertung der 70. Stufe, Probe T15 . . . . .	56
3.27	Auswertung vor Beginn des Stauchens, Probe T14 . . . . .	57
3.28	Auswertung der 85. Stufe, Probe T14 . . . . .	58
3.29	Auswertung der 96. Stufe, Probe T14 . . . . .	59
3.30	Auswertung der 100. Stufe, Probe T14, Längsriss mit ca. 2,5mm (a) . . . . .	60
3.31	Auswertung der 85. Stufe für die Hauptformänderung, Probe T14 . . . . .	61
3.32	Auswertung der 96. Stufe für die Hauptformänderung, Probe T14 . . . . .	61
3.33	Auswertung der 100. Stufe für die Hauptformänderung, Probe T14 . . . . .	62
3.34	Probe T14 mit Längsrissen nach dem Stauchen . . . . .	62
3.35	Auswertung zu Beginn des Stauchens, Probe 1 . . . . .	65
3.36	Auswertung der 50. Stufe, Probe 1 . . . . .	65
3.37	Auswertung der 100. Stufe, Probe 1 . . . . .	66
3.38	Probe 1 nach dem Stauchen . . . . .	66
3.39	Auswertung zu Beginn des Stauchens, Probe 21 . . . . .	67
3.40	Auswertung der 23. bis 26. Stufe, Probe 21 . . . . .	68
3.41	Auswertung des ersten Bildes zu Beginn des Stauchvorganges, Probe 28 . . . . .	69
3.42	Kurz vor Entstehung der Risse, Probe 28 . . . . .	70
3.43	Risse in Probe 28, 17. Stufe . . . . .	71
3.44	Probe 28 nach dem Stauchen . . . . .	72
3.45	Auswertung zu Beginn der Umformung, Probe 2 . . . . .	72
3.46	Auswertung der 4. Stufe, Probe 2 . . . . .	73
3.47	Auswertung der 20. Stufe, Probe 2 . . . . .	73

---

3.48 Auswertung der 20. Stufe, Probe 2 . . . . .	74
3.49 Die Probe N01 nach dem Stauchen . . . . .	75
3.50 Versuchsserie 2 und 3 . . . . .	75

# Tabellenverzeichnis

2.1	Zusammensetzung von UDIMET720 in Gewichtsprozent . . . . .	24
2.2	Zusammensetzung von AA6082 in Gewichtsprozent . . . . .	25
3.1	Versuche mit Udimet 720 . . . . .	39
3.2	Erste Versuchsserie mit AA6082 . . . . .	53
3.3	Zweite Versuchsserie mit AA6082 . . . . .	64
3.4	Dritte Versuchsserie mit AA6082 . . . . .	75

# Literaturverzeichnis

- [1] B. Buchner: “Projekt Stereoskopie”, *Projektarbeit, Institut für Automation, Montanuniversität Leoben* 2002.
- [2] “GOM - ARAMIS Benutzerhinweise”, *ARAMIS Benutzerhandbuch* 2005.
- [3] W. Tong, H. Tao, N. Zhang und L. G. H. Jr.: “Time-resolved strain mapping measurements of individual Portevin-Le Chatelier deformation bands”, *Scripta Materialia* **53**:87–92, 2005.
- [4] M. Sachtleber, Z. Zhao und D. Raabe: “Experimental investigation of plastic grain interaction”, *Materials Science and Engineering* **A336**:81–87, 2002.
- [5] D. Raabe, M. Sachtleber, H. Weiland, G. Scheele und Z. Zhao: “Grain-scale micromechanics of polycrystal surfaces during plastic straining”, *Acta Materialia* **51**(212):1539–1560, 2003.
- [6] “Einsatz von ARAMIS in der Bruchmechanik”, *Gom Optical Measuring Techniques*, <http://www.gom.com/> .
- [7] D. Bergmann und R. Ritter: “3D Deformation Measurement in small Areas based on Grating Method and Photogrammetry”, *Proc. SPIE* **2782**:212–223, 1996.
- [8] D. Behring, J. Thesing, H. Becker und R. Zobel: “Optical Coordinate Measuring Techniques for the Determination and Visualisation of 3D Displacements in Crash Investigations”, *Society of Automotive Engineers, Inc.* 2001.
- [9] “Spaltzugversuch an Verbundkörpern, Lehrstuhl für Massivbau der TU München”, *Gom Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH*, <http://www.gom.com/> .
- [10] D. Bergmann, K. Galanulis und R. Ritter: “Zum Einsatz der optischen Feldmeßtechnik in der Bruchmechanik”, *Institut für Meßtechnik und Experimentelle Mechanik, TU Braunschweig* 1997.
- [11] K. Galanulis: “Optical Measuring Technologies in Sheet Metal Processing”, *Gom Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH, Mittelweg 7, 38106 Braunschweig, Germany* .

- 
- [12] “Riveted joint under load, AIRBUS Bremen, Testing Technology”, *Gom Optical Measuring Techniques*, <http://www.gom.com/> .
- [13] “Complete deformation measurement using multiple ARAMIS sensors, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut of Structural Mechanics”, *Gom Optical Measuring Techniques*, <http://www.gom.com/> .
- [14] J. Tyson, T. Schmidt und K. Galanulis: “Advanced Photogrammetry For Robust Deformation and Strain Measurement”, *SEM 2002 Annual Conference, Milwaukee 2002*.
- [15] “Determination of Forming Limit Diagrams using ARAMIS”, *Gom Optical Measuring Techniques*, <http://www.gom.com/> .
- [16] M. Rumi: “Verformungsverhalten der Hochdruckturbinen-Scheibenlegierung Udimet 720 Li bei hohen Temperaturen”, *Dissertation, Technische Universität Berlin 2000*.
- [17] C. Bruni, M. El-Mehtedi, A. Forcellese, F. Gabrielli und M. Simoncini: “simulation of multipass hot rolling of AA 6082 aluminium alloy”, *Steel Grips 2, Suppl. Metal Forming* S. 109–114, 2004.
- [18] C. Sommitsch, R. Sievert, T. Wlanis, B. Gunther und V. Wieser: “Modelling of creep-fatigue in containers during aluminium and copper extrusion”, *Computational Materials Science* **39**:55–64, 2005.
- [19] G. Rüb: “Modellierung der Schädigung während der Warmumformung”, *Dissertation, Montanuniversität Leoben 2007*.