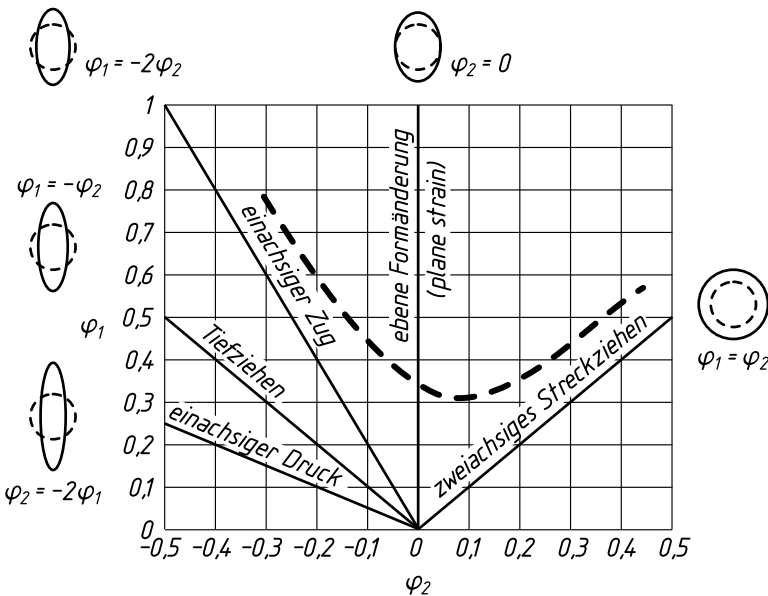


Insbesondere für die Blechumformung hat sich die Beschreibung der Umformbarkeit mit der **Grenzformänderungskurve** (bzw. Grenzformänderungsdiagramm) durchgesetzt. Sie beschreibt die Versagensgrenze bei unterschiedlichen Deformations- und Spannungszuständen und nicht nur beim einachsigen Spannungszustand, wie beim Zugversuch.

## b) Grenzformänderungskurve

Im Grenzformänderungsdiagramm ist für unterschiedliche Beanspruchungszustände das Versagen durch Einschnürung bzw. das Auftreten von Reißern (gestrichelte Linie im Bild 2.5) dargestellt. Diese Orte des Versagens werden in verschiedenen Tests ermittelt und im Diagramm (Hauptumformgrad  $\varphi_1$  über Nebenumformgrad  $\varphi_2$ ) eingetragen.

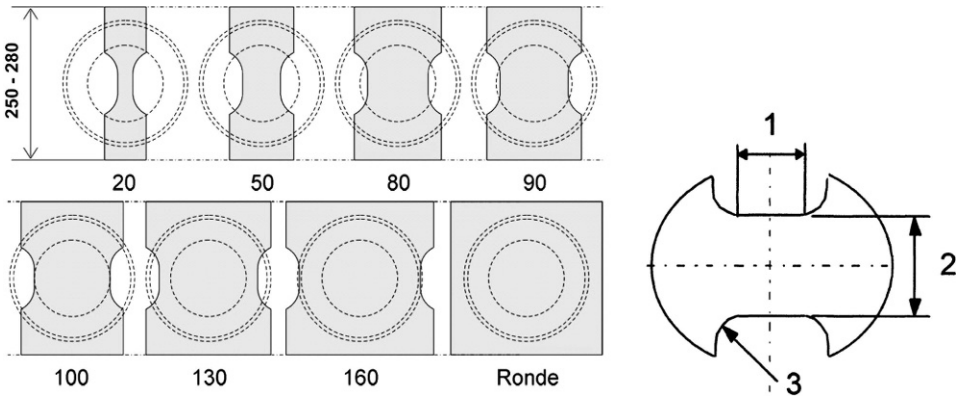


**Bild 2.5** Grenzformänderungsdiagramm mit eingezeichneten Formänderungen und Änderungen von Kreisrastermarkierungen auf Blechoberflächen (◐ vor, bzw. ◑ nach der Umformung)

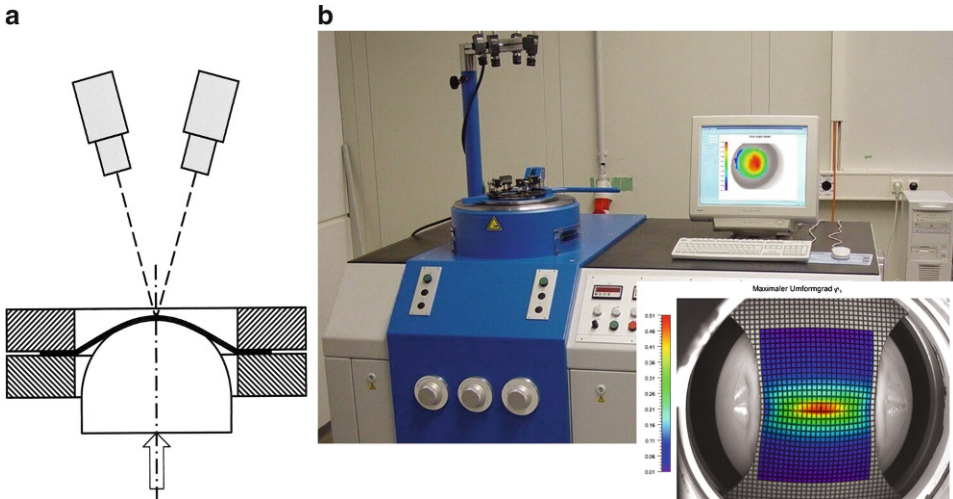
Für die experimentelle Ermittlung der Grenzformänderungskurve sind unterschiedliche Verfahren bekannt, die aufgrund ihrer Methodik die Lage der Kurve beeinflussen bzw. diese nur teilweise abbilden können. Das in Deutschland am weitesten verbreitete Verfahren ist das Ziehen von taillierten Proben über einen zylindrischen Stempel mit halbkugelförmigem Kopf (Stempeldurchmesser = 100 mm). Die Größe der Taillierung (s. Bild 2.6) beeinflusst den Formänderungszustand. Für eine Aufnahme einer vollständigen Grenzformänderungskurve sind mindestens fünf verschiedene Probenformen mit mindestens je drei Wiederholungen erforderlich. Je größer die Taillierung, umso weiter verschiebt sich der Messpunkt vom zweiachsigen Streckziehen ( $\varphi_1 = \varphi_2$ ) in Richtung einachsigen Zug ( $\varphi_1 = -2\varphi_2$ , d. h.  $\varphi_2 = \varphi_3$ ).

Es wird ein linearer Formänderungsverlauf, d. h. ein konstantes Verhältnis  $\varphi_2/\varphi_1$  angestrebt. Abweichungen davon führen zu nicht vergleichbaren Ergebnissen.

Die Proben werden vor der Umformung mit Markierungen (z. B. Quadratrasterlinien) versehen, in einem Werkzeug oder in einer Blechprüfmaschine fest eingespannt und über den Stempel bis zum Riss gezogen. Für vergleichbare Prüfbedingung wird versucht, die Reibung durch entsprechende Schmiermittel zu minimieren, so dass der Riss in der Kuppenmitte des Napfes initiiert wird. Die erreichte Formänderung vor dem Riss wird durch eine dreidimensionale Vermessung des Rasters und Auswertung (z. B. Methode der Visioplastizität) bestimmt. Hierfür haben sich in-process-Messtechniken (z. B. Autogrid<sup>®</sup> vario-System), die den Ort des Versagensbeginns (Beginn der lokalen Einschnürung, die zum Riss führt) mit Hilfe von optischen Messmethoden ermitteln, bewährt (siehe Bild 2.7).



**Bild 2.6** Probenformen für die Aufnahme von Grenzformänderungskurven (links) und genormte Probenformen nach [DIN EN ISO 12004-2 (Entwurf)] (rechts: 1 – Schaftlänge = 25 mm, 2 – Breite des Messbereichs = 20 mm, 50 mm, 90 mm, 100 mm, 130 mm, 160 mm, 200 mm (Ronde), 3 – Auslaufradius = 20 mm)



**Bild 2.7** a) Schema eines optischen 3D-Messsystems, und b) Einsatz des Messsystems AutoGrid<sup>®</sup> in-process in einer Erichsen Prüfmaschine mit Detailansicht des Prüfbereiches (Werkfoto: ViALUX GmbH Chemnitz; [www.vialux.de](http://www.vialux.de))

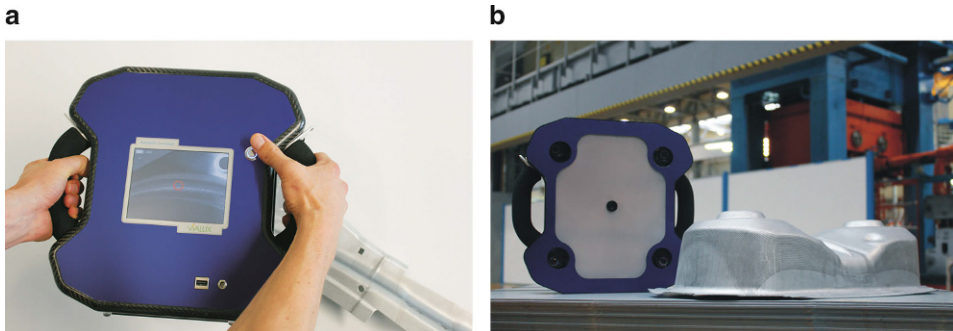
Der Ort des Versagens wird unterschiedlich bestimmt. Eine Möglichkeit besteht darin, dass das letzte Bild einer Sequenz von Aufnahmen vor dem sichtbaren Beginn des Versagens (Einschnürung oder Riss) für die Bestimmung der Grenzformänderungen herangezogen wird. Diese Herangehensweise ist aber subjektiv und so wird an automatischen Auswertemethoden gearbeitet. Dazu werden praktikable und reproduzierbare Kriterien verwendet, mit deren Hilfe der Beginn des lokalen Einschnürens an einer Folge von Bildsequenzen und den daraus abgeleiteten lokalen Formänderungen bestimmbar wird. Es kommen z. B. folgende Kriterien in Frage:

- Lokalisierung der Formänderungen im späteren Rissbereich
- verstärkter Anstieg der lokalen Formänderung  $\varphi_1$  und damit Erhöhung der Formänderungsgeschwindigkeit in diesem Bereich bei gleichzeitigem Stopp der Deformation in unmittelbar benachbarten Gebieten der lokalen Einschnürung
- Formänderung  $\varphi_2$  geht gegen null (nicht für den Bereich der ebenen Deformation).

Richtlinien für die Aufnahme von Grenzformänderungskurven werden z. Z. in der Norm DIN EN ISO 12004-2 u. a. vom Arbeitskreis „NAKAJIMA“ der deutschen Gruppe der International Deep Drawing Research Group (IDDRG) erarbeitet. Dieses Dokument soll im Rahmen der parallelen Abstimmung als Europäische Norm übernommen werden.

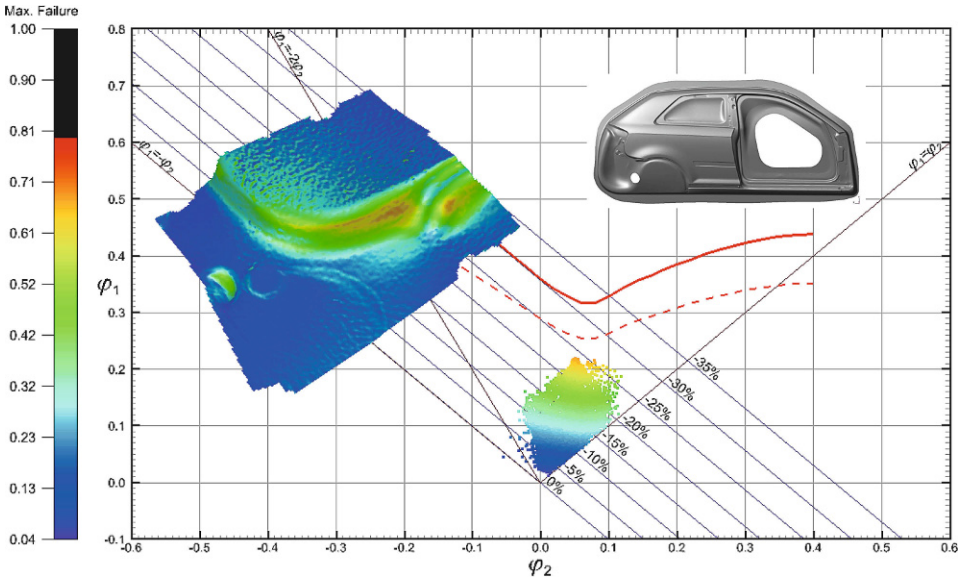
### c) Messung an realen Blechumformteilen

Im Bild 2.8 ist das neu entwickelte Handgerät AutoGrid<sup>®</sup> comsmart im Einsatz zu sehen, das es ermöglicht, die Vermessung der Formänderung direkt im Presswerk vorzunehmen. Das System arbeitet mit vier fest im Messkopf installierten Kameras; das ermöglicht ein stabiles Arbeiten ohne aufwendige Neukalibrierung. Das Gerät zeichnet sich durch Leichtbauweise (CFK), Robustheit und leichte Ein-Knopf-Bedienung aus. Pro Aufnahme werden 20 Millionen Pixel aufgenommen und sofort ausgewertet.



**Bild 2.8** Handgerät AutoGrid<sup>®</sup> comsmart im Einsatz im Presswerk (Werkfoto: ViALUX GmbH Chemnitz; [www.vialux.de](http://www.vialux.de))

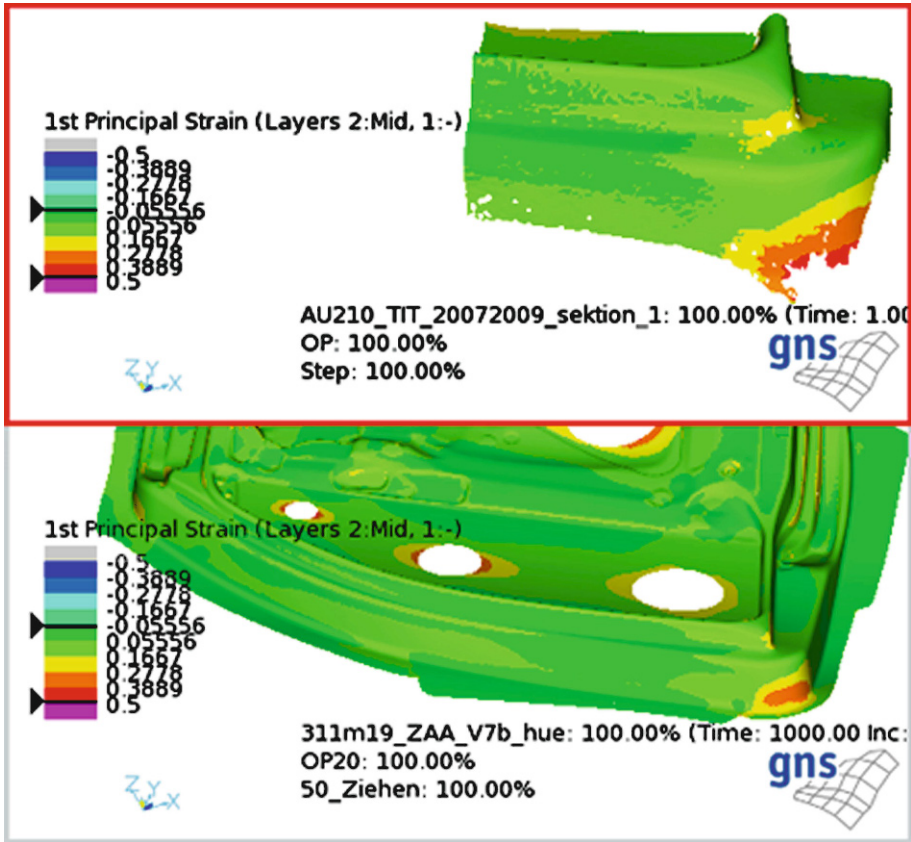
Die Ergebnisse der automatisch mit Hilfe der Software AutoGrid ermittelten lokalen Formänderungen sind in das Grenzformänderungsdiagramm aufgenommen worden und geben eine Aussage über das reale Verformungsverhalten auch im Vergleich zur Simulation und dienen im Presswerk zur Beurteilung der Umformwerkzeuge (siehe Bild 2.9).



**Bild 2.9** Ergebnis der Formänderungsanalyse (Werkfoto: AUDI AG, Ingolstadt)

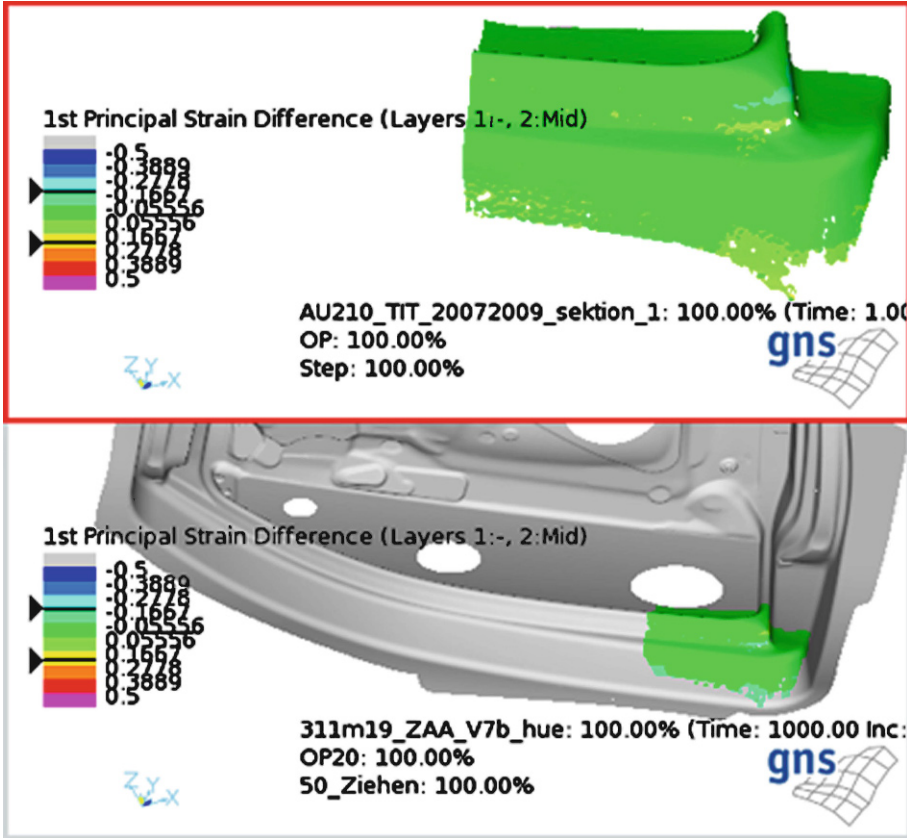
Wenn es zu einem Umformteil sowohl Ergebnisse einer lokalen AutoGrid®-Formänderungsanalyse als auch einer FEM-Simulation gibt, können beide Ergebnisse im Postprocessing-Teil der Software OpenForm der Firma GNS geladen werden (siehe Bild 2.10).





**Bild 2.10** Vergleich der FEM-Analyse und der AutoGrid®-Formänderungsanalyse (Werkfoto: ViALUX GmbH Chemnitz; [www.vialux.de](http://www.vialux.de))

Dann kann die gemessene lokale Ergebnisfläche der AutoGrid®-Messung in die FEM-Geometrie gefittet werden und die Abweichungen der Ergebnisse an den jeweiligen Positionen ermittelt werden (siehe Bild 2.11).



**Bild 2.11** Darstellung der Abweichungen der FEM-Analyse und der AutoGrid®-Formänderungsanalyse (Werkfoto: ViALUX GmbH Chemnitz; [www.vialux.de](http://www.vialux.de))

Diese Darstellung erlaubt eine wesentlich bessere Aussage zum realen Formänderungsverhalten und damit zur Optimierung des betreffenden Umformwerkzeuges.

## 2.5 Formänderungsgrad und Hauptformänderung

### 2.5.1 Massivumformverfahren

Das Maß für die Größe einer Formänderung ist der Formänderungsgrad. Die Berechnung erfolgt allgemein aus dem Verhältnis einer unendlich kleinen Abmessungsdifferenz  $dx$  auf eine vorhandene Abmessung  $x$ . Durch Integration in den Grenzen  $x_0$  bis  $x_1$  erhält man

$$\varphi_x = \int_{x_0}^{x_1} \frac{dx}{x} = \ln \frac{x_1}{x_0}.$$

Dabei wird vorausgesetzt, dass das Volumen des umzuformenden Körpers bei der Umformung konstant bleibt

$$V = l_0 \cdot b_0 \cdot h_0 = l_1 \cdot b_1 \cdot h_1.$$