

## Untersuchung der Rückfederung tiefgezogener Bleche

Heinen, F.; Tawil, M.

Das Tiefziehen zählt zu den am häufigsten angewendeten Blechverarbeitungsverfahren. In den letzten Jahren sind die Anforderungen an die Genauigkeit von Blechteilen dramatisch gestiegen. Verbesserungen bzgl. dieser Anforderungen können nur durch eine höhere Transparenz des Tiefziehprozesses erreicht werden. Besonders die Vorhersage der Rückfederung an tiefgezogenen Teilen ist immer noch sehr komplex und in vielen Fällen nicht möglich. Aus diesem Grund wurde im SFB 362 eine Methode zur Vorherbestimmung der Rückfederung an tiefgezogenen Blechteilen entwickelt.

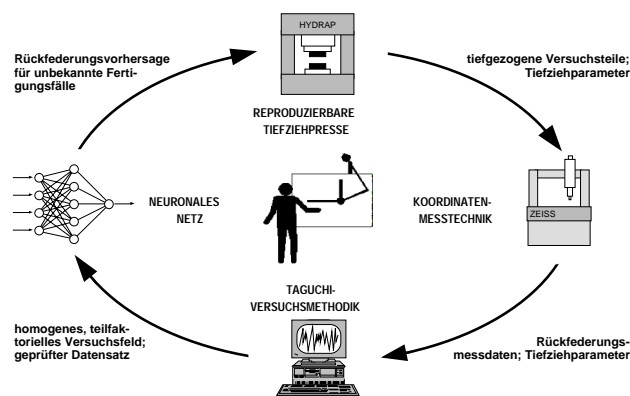
Deep drawing counts to the most used sheet metal treatment processes. Within the last years the demands concerning accuracy of sheet metal parts are dramatically increased. Improvements to these demands can only be reached by a better transparency of the deep drawing process. Especially the forecast of the spring-back of transformed parts is still very complex and in most cases impossible. For that reason the special research scheme SFB 362 includes a project which develops a method to calculate the spring-back of deep drawing parts in advance.

### 1 Einführung

Das Tiefziehen zählt zu den am häufigsten angewendeten Umformverfahren bei der Blechverarbeitung. Bei genauer Betrachtung des Tiefziehens stellt man fest, daß bis heute nicht alle Fragestellungen dieses Verfahrens gelöst sind. Insbesondere die Konstruktion von Werkzeugen bereitet immer noch Probleme. Die Ursache hierfür liegt im elastischen Verhalten der Bleche, welches an tiefgezogenen Werkstücken Rückfederung hervorruft. Die Rückfederung ist von einer sehr großen Anzahl an Einflußgrößen (Geometrie, Werkstoff, Niederhaltdruck, Werkzeug/Maschine, Reibungsverhältnisse, etc.) abhängig, so daß der Konstrukteur im wesentlichen auf Erfahrungswissen angewiesen ist. Außerdem ist der Prozeß des Tiefziehens ein instationärer Umformvorgang, d.h. auftretende Spannungen, Formänderungen sowie Reibungsverhältnisse und damit die Veränderung der Oberflächenbe-

schaffenheit sind während des Tiefziehvorgangs zeitlich und örtlich verschieden und aus diesem Grund nur sehr schwer zu erfassen. Bis heute existieren nur vereinzelt Ansätze zur Lösung dieser Problematik, von denen sich nur wenige durchgesetzt haben. Hauptgründe hierfür sind, daß die bei diesen Ansätzen getroffenen Annahmen die tiefziehtechnische Realität entweder nicht hinreichend praxisnah beschreiben oder versuchstechnische Vereinfachungen außerhalb des Labors nicht umsetzbar sind.

Aus den o.g. Gründen wurde eine Methode zur Vorherbestimmung der Rückfederung an Tiefziehteilen entwickelt, die in der Konstruktion und der Fertigung eingesetzt werden kann. Ein wesentlicher Vorteil dieser Methodik ist die implizite Verarbeitung von Störgrößen und unbekanntem Parametern bei der Vorhersage der Tiefziehergebnisse. Eine Vernachlässigung dieser Größen setzt die Aussagekraft der Ergebnisse herab und macht sie für einen praxisnahen Einsatz ungeeignet. **Bild 1** zeigt die vier Hauptschritte, die zwecks Rückfederungsvorhersage durchlaufen werden müssen.



**Bild 1:** Szenario zur Rückfederungsvorhersage von Tiefziehteilen

Zunächst werden auf einer Tiefziehpresse Blechteile unter Variation der einzustellenden Tiefziehparameter hergestellt. Der zweite Schritt beinhaltet die Vermessung der so hergestellten Blechteile bzgl. ihrer Rückfederungswerte. Schließlich erfolgt die Auswertung nach der sogenannten Taguchi-Versuchsmethodik, die gleichzeitig das für den er-

sten Schritt notwendige Versuchsschema vorgibt. Mit diesen Daten wird dann im letzten Schritt ein künstliches neuronales Netz entwickelt, angepaßt und trainiert, so daß hierauf basierend Vorhersagen für Blechteile ähnlicher Geometrie bzgl. ihrer Rückfederungen geliefert werden können

## 2 Versuchseinrichtungen

In mehreren Versuchsreihen wurden unter Nutzung der am Institut für Umformtechnik (IFUM) der Universität Hannover befindlichen Ziehpresse (einfach wirkende hydraulische Doppleständer Stanz- und Ziehpresse der Firma Hydrap) fast 400 rechteckige Näpfe gezogen. Innerhalb der Versuchsreihen wurden Tiefziehparameter und Werkstoffe nach vorheriger Festlegung durch die Taguchi-Versuchsmethodik variiert.

Für die durchgeführten Versuche wurden nach DIN 1623 Feinbleche der Dicke 1 mm verwendet. Die Werkstoffkennwerte der in dieser Untersuchung benutzten Bleche wurden auf einer Zugprüfmaschine der Firma DynaMess am IFUM ermittelt. Hierbei wurden die einzelnen Proben in Walzrichtung, also unter 0°, getestet, wobei von jedem Werkstoff drei Zugproben angefertigt und deren Ergebnisse arithmetisch gemittelt wurden.

Die tiefgezogenen Teile wurden anschließend auf der am Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal befindlichen Koordinatenmeßmaschine (Zeiss UMM 550) mittels CNC-Programm hinsichtlich ihrer Rückfederungserscheinungen vermessen.

## 3 Taguchi-Versuchsmethode

Allgemein hat man bei statistischen Methoden und Klassifikatoren, also z.B. neuronalen Netzen, stets das grundlegende Problem, eine möglichst repräsentative Datenmenge zur Weiterverarbeitung vorliegen zu haben. Die Daten sollen zufällig ermittelt sein, um insbesondere bei geringen Probenzahlen unbeabsichtigte Gewichtungen zu vermeiden. Aus diesem Grund müssen bei der Gewinnung solcher Datensätze bestimmte Vorgehensweisen unbedingt eingehalten werden. Die Taguchi-Versuchsmethodik ist im Zusammenhang dieser Untersuchung ein Werkzeug, um einen zufälligen Datensatz, der aber gleichzeitig das gesamte Versuchsfeld systematisch abdeckt zu erzeugen. Desweiteren ist es wichtig, die ausgewählten Einflußparameter so zu untersuchen, daß die Wirkung eines

Parameters nicht die Wirkung eines anderen verfälscht. Um in einem Faktorversuch die Unabhängigkeit der Effekte zu gewährleisten, arbeitet man daher mit sogenannten orthogonalen Versuchsfeldern.

Orthogonale Versuchspläne haben die Form einer Matrix. In dieser Matrix wird jede Spalte mit einem zu untersuchenden Faktor belegt. Die Faktoren besitzen unterschiedliche Einstellwerte, die als Stufen bezeichnet werden. Die Kennzeichnung der einzelnen Stufen erfolgt im Versuchsplan durch die Zahlen „1“ und „2“ (**Tabelle 3.2**).

Die Zeilen der Versuchsmatrix entsprechen der jeweiligen Faktorkombination. Eine Faktorkombination stellt einen Versuch innerhalb eines Experiments dar.

### 3.1 Erstellung des Versuchsplans

#### 1. Festlegung der Versuchsparameter:

Zunächst müssen die Faktoren bestimmt werden, die den Ziefziehprozeß entscheidend beeinflussen. In Diskussionen mit blechverarbeitenden Betrieben und Forschungsstellen wurden folgende Parameter als besonders wichtig herausgestellt und daher in den vorliegenden Untersuchungen berücksichtigt:

- Niederhalterdruck,
- Ziehverhältnis,
- Ziehgeschwindigkeit,
- Schmierung und
- Stempelkantenradius.

Obwohl ebenfalls von großem Interesse, wurden die Faktoren Blechdicke und Ziehringradius in den hier durchgeführten Untersuchungen nicht variiert. Grund hierfür ist, daß sie gleichzeitig zu viele weitere Invarianten mit einbrächten (Blechdicke/-Charge, Oberfläche, Anitocoritbenetzung usw.; Ziehringradius, Werkzeugoberfläche, Formabweichungen, Ecken-Kanten-Radienverhältnis usw.). Diese Parameter sollen daher erst in späteren Versuchsreihen berücksichtigt werden.

#### 2. Festlegung der Einstellwerte:

Nachdem die zu untersuchenden Haupteinflußfaktoren gefunden wurden, können nun deren Einstellwerte festgelegt werden. Um die Effekte der Faktoren möglichst deutlich herauszustellen, sollten

die Einstellwerte technisch sinnvolle Extremwerte darstellen. Als Grenzen des Tiefziehprozesses können Bodenreißer und Faltenbildung angegeben werden. Auf sie ist bei der Festlegung der Einstellwerte zu achten.

Nach Vorversuchen und einer Abstimmung mit tiefzieherfahrenen Praktikern wurden die Einstellungen der Parameter für die unterschiedlichen Versuchsreihen festgelegt. **Tabelle 3.1** stellt die Parameter der Versuchsreihe DC 05 - einseitig elektrolytisch verzinkt - exemplarisch dar.

| DC 05               | Stufe 1                         | Stufe 2                         |
|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Niederhalterdruck   | 2 N/mm <sup>2</sup>             | 3 N/mm <sup>2</sup>             |
| Ziehverhältnis      | $\beta_1 = 1,6$                 | $\beta_2 = 1,77$                |
| Ziehgeschwindigkeit | $v_1 = 14,4$ mm/s               | $v_2 = 22,4$ mm/s               |
| Schmierung          | Anlieferungszustand (Anticorit) | Ziehöl CLF 180 der Firma Raziol |
| Stempelkantenradius | $r_1 = 6$ mm                    | $r_2 = 12$ mm                   |

**Tabelle 3.1:** Parametereinstellungen Versuchsreihe DC 05 (einseitig elektrolytisch verzinkt)

Die Ziehverhältnisse wurden Tabellenwerken aus /1/ entnommen. Die Ziehgeschwindigkeiten wurden nach Pressenmöglichkeiten festgelegt. Bei der Schmierung wurde der Anlieferungszustand untersucht. Die angelieferten Bleche sind aus Korrosionsschutzgründen mit Anticorit benetzt. Desweiteren wurde das in der Industrie weit verbreitete Ziehöl CLF 180 der Firma Raziol untersucht. Bei den Stempelkantenradien wurden 6 mm und 12 mm untersucht. Diese Radien waren durch die zur Verfügung stehenden Werkzeuge vorgegeben.

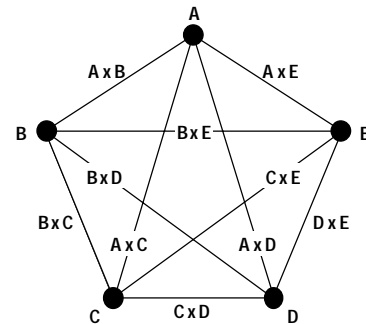
3. Zuordnung des Versuchsfeldes:

Um die Zuordnung durchzuführen, werden die gefundenen Haupteinflussfaktoren zunächst mit Buchstaben gekennzeichnet. Es folgt:

- A Niederhalterdruck
- B Ziehverhältnis

- C Ziehgeschwindigkeit
- D Schmierung
- E Stempelkantenradius

Die Zuordnung der Parameter und deren Wechselwirkungen auf das Versuchsfeld wird mit Hilfe eines linearen Graphen vorgenommen. Da sämtliche Wechselwirkungen der Parameter untereinander interessieren, wird ein diesen Sachverhalt beschreibender Graph gewählt, welcher in **Bild 3.1** zu sehen ist.



**Bild 3.1:** Linearer Graph der Versuchsmatrix /2/

|         |          | 1 | 2 | 3   | 4 | 5   | 6   | 7   | 8 | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15 |
|---------|----------|---|---|-----|---|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
|         | Faktoren | A | B | AxB | C | AxC | BxC | DxE | D | AxD | BxD | CxE | CxD | BxE | AxE | E  |
| Versuch |          |   |   |     |   |     |     |     |   |     |     |     |     |     |     |    |
| 1       |          | 1 | 1 | 1   | 1 | 1   | 1   | 1   | 1 | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  |
| 2       |          | 1 | 1 | 1   | 1 | 1   | 1   | 1   | 2 | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2  |
| 3       |          | 1 | 1 | 1   | 2 | 2   | 2   | 2   | 1 | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2  |
| 4       |          | 1 | 1 | 1   | 2 | 2   | 2   | 2   | 2 | 2   | 2   | 2   | 1   | 1   | 1   | 1  |
| 5       |          | 1 | 2 | 2   | 1 | 1   | 2   | 2   | 1 | 1   | 2   | 2   | 1   | 1   | 2   | 2  |
| 6       |          | 1 | 2 | 2   | 1 | 1   | 2   | 2   | 2 | 2   | 1   | 1   | 2   | 2   | 1   | 1  |
| 7       |          | 1 | 2 | 2   | 2 | 2   | 1   | 1   | 1 | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 1   | 1  |
| 8       |          | 1 | 2 | 2   | 2 | 2   | 1   | 1   | 2 | 2   | 1   | 1   | 1   | 1   | 2   | 2  |
| 9       |          | 2 | 1 | 2   | 1 | 2   | 1   | 2   | 1 | 2   | 1   | 2   | 1   | 2   | 1   | 2  |
| 10      |          | 2 | 1 | 2   | 1 | 2   | 1   | 2   | 2 | 1   | 2   | 1   | 2   | 1   | 2   | 1  |
| 11      |          | 2 | 1 | 2   | 2 | 1   | 2   | 1   | 1 | 2   | 1   | 2   | 2   | 1   | 2   | 1  |
| 12      |          | 2 | 1 | 2   | 2 | 1   | 2   | 1   | 2 | 1   | 2   | 1   | 1   | 2   | 1   | 2  |
| 13      |          | 2 | 2 | 1   | 1 | 2   | 2   | 1   | 1 | 2   | 2   | 1   | 1   | 2   | 2   | 1  |
| 14      |          | 2 | 2 | 1   | 1 | 2   | 2   | 1   | 2 | 1   | 1   | 2   | 2   | 1   | 1   | 2  |
| 15      |          | 2 | 2 | 1   | 2 | 1   | 1   | 2   | 1 | 2   | 2   | 1   | 2   | 1   | 1   | 2  |
| 16      |          | 2 | 2 | 1   | 2 | 1   | 1   | 2   | 2 | 1   | 1   | 2   | 1   | 2   | 2   | 1  |

**Tabelle 3.2:** Versuchsmatrix L16 mit zugeordneten Parametern und Wechselwirkungen (DC 05 einseitig elektrolytisch verzinkt)

Zur Ermittlung der erforderlichen Größe des Feldes werden sämtliche Freiheitsgrade der einzelnen Parameter und Wechselwirkungen addiert. Die Summe aller Freiheitsgrade muß gleich oder kleiner

dem Freiheitsgrad des Feldes sein. Um den Freiheitsgrad des Feldes zu ermitteln, muß von der Anzahl der Versuche, welche durch das orthogonale Feld festgelegt wird, der Wert 1 subtrahiert werden. Demzufolge sind für die hier zu untersuchenden Versuchsreihen mindestens Versuchsfelder der Größe L16 zu verwenden. **Tabelle 3.2** zeigt das Versuchsfeld für den Werkstoff DC 05.

In Form der Versuchsmatrix sind nun die Faktorkombinationen für jeden Versuchslauf festgelegt. Um eine statistische Absicherung der einzelnen Versuche zu erhalten, wird jeder Versuch mehrmals durchgeführt, wobei die Anzahl der Wiederholungen bei den hier vorliegenden Versuchsreihen von der zur Verfügung stehenden Menge eines jeden Werkstoffs abhängig waren.

**Tabelle 3.3** zeigt den endgültigen Versuchsplan. Da sich die Parameterwechselwirkungskombinationen aus den Einstellungen der einzelnen Parameter ergeben, sind im Versuchsplan nur die betreffenden Spalten 1, 2, 4, 8 und 15 aus **Tabelle 3.2** angegeben. In den Versuchsplanspalten 8 bis 11 sind die Nummern der jeweiligen Werkstücke, in Spalte 7 ist die Reihenfolge der einzelnen Versuche dargestellt. Die eindeutige Kennzeichnung der Werkstücke erfolgt nach dem Tiefziehvorgang mit Hilfe einer Reißnadel.

| Parameter                  | Niederhaltedruck |   |   |   | Ziehverhältnis |                | Ziehgeschwindigkeit |    | Schmierung |                | Stempelkantenradius |    | Versuchsreihenfolge |                |    |    |    |                |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |
|----------------------------|------------------|---|---|---|----------------|----------------|---------------------|----|------------|----------------|---------------------|----|---------------------|----------------|----|----|----|----------------|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|
|                            | A                | B | C | D | E              | Wiederholung 1 |                     |    |            | Wiederholung 2 |                     |    |                     | Wiederholung 3 |    |    |    | Wiederholung 4 |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |
| Sp.-Nr. in Orthogonaltafel | 1                | 2 | 4 | 8 | 15             |                |                     |    |            |                |                     |    |                     |                |    |    |    |                |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |
| Merkmalskombination        | 1                | 1 | 1 | 1 | 1              | 4              | 13                  | 14 | 15         | 16             | 12                  | 45 | 46                  | 47             | 48 | 13 | 49 | 50             | 51 | 52 | 6 | 21 | 22 | 23 | 24 | 15 | 57 | 58 | 59 | 60 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 7 | 25 | 26 | 27 | 28 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 5 | 6 | 7 | 8 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 9 | 33 | 34 | 35 | 36 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 14 | 53 | 54 | 55 | 56 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 5 | 17 | 18 | 19 | 20 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 | 9 | 10 | 11 | 12 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 11 | 41 | 42 | 43 | 44 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 10 | 37 | 38 | 39 | 40 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 16 | 61 | 62 | 63 | 64 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 8 | 29 | 30 | 31 | 32 |

**Tabelle 3.3:** Versuchsplan für Versuchsreihe DC 05 (einseitig elektolytisch verzinkt)

## 3.2 Auswertung der Versuche

### 3.2.1 Werkstück- und Werkzeugvermessung

Für jede einzelne Napfseite wurde ein Meßprotokoll erstellt. Mittels der Meßmaschinensoftware konnten Minimum und Maximum einer jeden Meßkurve ermittelt werden. Hieraus wurden die t-IST-Abweichungen bestimmt. Diese Werte sind ein Maß für die Rückfederung. Die Rückfederung ist die geometrische Abweichung des Werkstücks vom Fertigungswerkzeug, welches auf Sollmaß gefertigt ist. Um diese Abweichung bestimmen zu können, wurden die Werkzeuge vermessen. Die Meßergebnisse ergaben eine sehr gute Übereinstimmung mit den Angaben in der Fertigungszeichnung. Auch Formabweichungen der Werkzeuge waren nicht nachweisbar.

### 3.2.2 Auswertung der Meßergebnisse

Die Auswertung der Meßergebnisse wird hier exemplarisch an der Versuchsreihe DC 05 - einseitig elektolytisch verzinkt - durchgeführt.

Die Taguchi Versuchsmethodik schreibt zunächst vor, das Signal-Rausch-Verhältnis für die Meßwerte zu berechnen. Ist der Rauschabstand groß, liegt ein gutes Signal vor, das durch das Rauschen kaum gestört wird. Unter Rauschen ist in diesem Fall die Streuung der Meßwerte innerhalb eines Versuchs zu verstehen. Die auftretenden Fehler von Wiederholung zu Wiederholung eines jeden Versuchs werden durch den S/N-Wert /3/ ebenfalls berücksichtigt.

Die versuchstechnisch gewonnenen Daten werden der **Tabelle 3.3** zugeordnet. Anschließend wird für jede Merkmalskombination das Signal-Rausch-Verhältnis in der neuen Spalte 12 gebildet. Nachdem die S/N-Werte für alle 16 Versuche gebildet wurden, wird deren Summe errechnet. Hieraus ergibt sich der Mittelwert der S/N-Werte. Nun kann die Quadratsumme der Abweichungen vom Mittelwert gebildet werden. Nachdem die S/N-Werte bestimmt worden sind, wird als nächstes die durchschnittliche Wirkung der Einstellungen eines jeden Faktors berechnet. Dies geschieht, indem man diejenigen S/N-Werte addiert, die laut Versuchsmatrix die gleichen Indizes besitzen. Die Addition der S/N-Werte für die jeweiligen Faktoreinstellungen erfolgt in den Spalten 2 und 3 der **Tabelle 3.4** zum Summeneffekt der jeweiligen Stufe. Die Einzeleffekte in den Spalten 4 und 5 ergeben sich aus der Division der Summeneffekte durch die Anzahl der Faktoreinstellungen. Anschließend wird in

Spalte 6 der **Tabelle 3.4** die Abweichung zwischen den Einzeleffekten der jeweiligen Faktoren ermittelt.

Aus den Zahlenwerten in Spalte 6 läßt sich bereits qualitativ ableiten, welche Faktoren oder Wechselwirkungen einen großen Einfluß auf das Gesamtsystem ausüben. Im vorliegenden Fall übt der Faktor B (Ziehverhältnis) den größten Einfluß mit einer Abweichung von -1,9509 aus.

Um eine quantitative Aussage über den Einfluß der einzelnen Parameter und Wechselwirkungen treffen zu können, wird eine Varianzanalyse durchgeführt. Zu diesem Zweck werden die Variation S und der Varianz V der einzelnen Faktoren in Spalte 7 bestimmt.

| 1        | 2                         | 3                         | 4                         | 5                         | 6               | 7   | 8                         |
|----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|---|---------------------------|
| Faktoren | Summen-<br>effekt Stufe 1 | Summen-<br>effekt Stufe 2 | Einzel-<br>effekt Stufe 1 | Einzel-<br>effekt Stufe 2 | Abwei-<br>chung | S und V (da<br>alle Frei-<br>heits-<br>grade=1) | Prozent-<br>Anteil<br>[%] |
| A        | 34,2079                   | 29,7691                   | 4,2760                    | 3,7211                    | -0,5549         | 1,2314  | 4,3                       |
| B        | 39,7919                   | 24,1851                   | 4,9740                    | 3,0231                    | -1,9509         | 15,2234   | 52,7                      |
| AxB      | 34,0682                   | 29,9088                   | 4,2585                    | 3,7386                    | -0,5199         | 1,0813  | 3,7                       |
| C        | 31,3376                   | 32,6393                   | 3,9172                    | 4,0799                    | 0,1627          | 0,1059  | 0,4                       |
| AxC      | 32,5730                   | 31,4039                   | 4,0716                    | 3,9255                    | -0,1461         | 0,0854  | 0,3                       |
| BxC      | 32,3230                   | 31,6540                   | 4,0404                    | 3,9567                    | -0,0836         | 0,0280  | 0,1                       |
| DxE      | 32,2114                   | 31,7656                   | 4,0264                    | 3,9707                    | -0,0557         | 0,0124  | 0,0                       |
| D        | 29,6926                   | 34,2844                   | 3,7116                    | 4,2855                    | 0,5740          | 1,3178  | 4,6                       |
| AxD      | 33,0510                   | 30,9260                   | 4,1314                    | 3,8657                    | -0,2656         | 0,2822  | 1,0                       |
| BxD      | 31,9785                   | 31,9985                   | 3,9973                    | 3,9998                    | 0,0025          | 0,0000  | 0,0                       |
| CxE      | 31,9670                   | 32,0100                   | 3,9959                    | 4,0012                    | 0,0054          | 0,0001  | 0,0                       |
| CxD      | 31,7759                   | 32,2011                   | 3,9720                    | 4,0251                    | 0,0532          | 0,0113  | 0,0                       |
| BxE      | 34,1612                   | 29,8158                   | 4,2702                    | 3,7270                    | -0,5432         | 1,1802  | 4,1                       |
| AxE      | 31,7037                   | 32,2733                   | 3,9630                    | 4,0342                    | 0,0712          | 0,0203  | 0,1                       |
| E        | 37,7622                   | 26,2148                   | 4,7203                    | 3,2769                    | -1,4434         | 8,3338  | 28,8                      |
|          |                           |                           |                           |                           |                 |   | 100,0                     |

**Tabelle 3.4:** Taguchi-Berechnungstabelle der Versuchsreihe 0 (DC 05)

In Spalte 8 ist der prozentuale Anteil p eines jeden Faktors an der Qualitätsmerkmalsänderung angegeben. Man erkennt, daß der Faktor B, das Ziehverhältnis, mit einem Prozentanteil von  $p_B = 52,7 \%$

den größten Einfluß auf das Qualitätsmerkmal Rückfederung hat.

### 3.2.3 Einflüsse auf die Rückfederung

Die im vorangegangenen Kapitel errechneten Einflüsse sind ausschließlich für die hier exemplarisch dargestellte Versuchsreihe (DC 05 - einseitig elektrolytisch verzinkt) gültig. Die Werkstoffe der anderen Versuchsreihen weisen zwar ähnliche, nicht aber identische Ergebnisse auf.

#### 3.2.3.1 Technologische Einflüsse

Den größten Einfluß auf die Formabweichung der Tiefziehteile der hier untersuchten Versuchsreihe hat mit 52,7 % das Ziehverhältnis (B). Der Einfluß der anderen technologischen Parameter liegt unter 10 %. Der Prozentanteil des Niederhalterdrucks (A) liegt bei 4,3 %, der Anteil der Schmierung (D) bei 4,6 %. Den geringsten Einfluß übt die Ziehgeschwindigkeit (C) mit 0,4 % aus.

#### 3.2.3.2 Einfluß der Geometrie

Einflüsse auf die Rückfederung, welche durch die Geometrie des Werkstücks festgelegt sind, wurden im vorliegenden Fall durch die Variation des Stempelkantenradius berücksichtigt.

Der Einfluß des Stempelkantenradius (E) wurde mit einem Anteil von 28,8 % am Gesamtergebnis ermittelt. Der Stempelkantenradius übt insgesamt den zweitstärksten Einfluß auf die Formabweichung aus. Die Gesamtformabweichung der untersuchten Werkstücke läßt sich somit durch Einstellungen der Parameter B und E (Ziehverhältnis und Stempelkantenradius) zu 80 % beeinflussen. Diese beiden Parameter stellen die Haupteinflussfaktoren dar.

### 3.2.3.3 Parameter-Wechselwirkungen

Der prozentuale Anteil der Wechselwirkungen zwischen den Parametern ist in **Tabelle 3.4** ebenfalls angegeben. Auch hier liegt die stärkste Wechselwirkung zwischen den Parametern B und E vor. Dieser Einfluß wurde unter Berücksichtigung des S/N-Wertes zu 4,1 % bestimmt. Weitere signifikante Wechselwirkungen treten lediglich noch zwischen den Parametern A und B (Niederhalterdruck und Ziehverhältnis) sowie zwischen den Parametern A und D (Niederhalterdruck und Schmierung) auf. Der Gesamtanteil der Wechselwirkungseinflüsse auf den Gesamteffekt beträgt 9,3 %.

## 4 Künstliche neuronale Netze

Im folgenden werden die aus den Versuchsreihen resultierenden Rückfederungsdaten des Werkstoffs DC 05 (einseitig elektrolytisch verzinkt) mittels künstlicher neuronaler Netze analysiert.

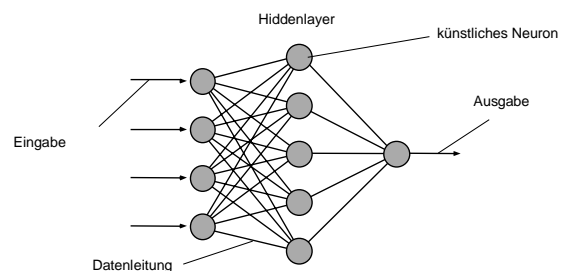
Künstliche neuronale Netze orientieren sich in ihrem Aufbau und ihrer Konzeption am biologischen Vorbild Nervensystem /4/. Sie versuchen, dessen Strukturen und Funktionsweisen nachzubilden und komplexe menschliche Denkvorgänge zu simulieren. Ein solches künstliches System besteht ähnlich dem Gehirn aus einer Vielzahl gleichartiger Elemente (Neuronen), die parallel und unabhängig voneinander Informationen speichern, verarbeiten und weiterleiten.

Es gibt heute eine Vielzahl unterschiedlicher künstlicher neuronaler Netztypen. Welcher Typ bei welchem Anwendungsfall Verwendung findet, ist stets von der vorliegenden Problemstellung abhängig. Ein neuronales Netz muß immer auf die vorliegende Problematik angepaßt werden. Die Grundbausteine der Netze, also die kleinsten Verarbeitungseinheiten, die Neuronen, unterscheiden sich bei den verschiedenen Netztypen nur wenig.

Prinzipiell kann ein Neuron als Schaltung verstanden werden, welche eine Ausgabe erzeugt, wenn der kumulative Effekt der Eingabereize einen bestimmten Schwellenwert übersteigt, d.h. für jeden Eingabezweig gibt es externe Eingabesignale oder Reize sowie eine entsprechende Gewichtung. Diese Gewichtung stellt eine Art Filter dar. Sie kann die Eingabesignale verstärken (exzitatorische Eingabe) oder abschwächen (inhibitorische Eingabe). Die Gewichtung  $w = 0$  bedeutet „keine Verbindung“. Eingabewerte, Gewichtungen und Ausgabewerte können reell (+ oder -), binär (0, 1) oder bipolar (-1, +1) sein.

## 4.1 Backpropagation-Netz

Die Entwicklung der neuronalen Netze für die vorliegende Problemstellung der Rückfederungsvorhersage an Tiefziehteilen stellte eine stark iterativ geprägte Vorgehensweise dar. Zahlreiche Netztypen wurden angepaßt, durchgerechnet und optimiert. Nach der Testphase mit diversen Netztypen zeigt sich das Backpropagation-Netz (Fehlerrückführungsmethode, **Bild 4.1**) als für die vorliegende Problemstellung am besten geeignet. Hierbei handelt es sich um ein Feedforward-Netzwerk, welches mindestens eine interne Schicht (Hidden-Layer) besitzt. Diese Art von Netzwerken ist in der Lage, auf Basis von nichtlinearen Daten zu arbeiten.



**Bild 4.1:** Backpropagation-Netz

Das Backpropagation-Netz besteht aus einem Input-Layer, einem oder mehreren Hidden-Layern und einem Output-Layer. Der Input-Layer dient zur Eingabe der Daten, welche reelle Zahlen zwischen 0 und 1 sein müssen. Liegen von der Wertigkeit her größere Eingabedaten vor, so müssen diese erst normiert werden. Die Neuronen des Input-Layers haben die Aufgabe, die eingegebenen Daten auf den nachfolgenden Layer zu verteilen. Die Anzahl der Input-Neuronen ergibt sich aus der vorliegenden Problemstellung. In der Gewichtung des Hidden-Layers ist ein Teil des gelernten Wissens gespeichert. Der Output-Layer dient zur Ausgabe der vom Netzwerk erzeugten Antworten auf die Input-Werte. Die Gewichtungen der Output-Neuronen beinhalten ebenfalls einen Teil des Wissens. Auch hier ist die Neuronenanzahl von der Problemstellung abhängig /5/.

Die Arbeitsweise eines Backpropagation-Netzes stellt sich somit wie folgt dar:

Die Input-Neuronen antworten auf ein Eingabemuster mit Werten, die auf die Hidden-Neuronen gegeben werden. Deren Ausgänge wirken wiederum auf das oder die Neuronen des Ausgabe-Layers und erzeugen einen Output. Der Output  $O$  wird mit

dem gewünschten Wert  $t$  (target) verglichen. Hieraus wird dann entsprechend untenstehender Gleichung der quadratische Fehler  $E$  berechnet.

$$E = \frac{1}{2} \sum_k (t_k - O_k)^2$$

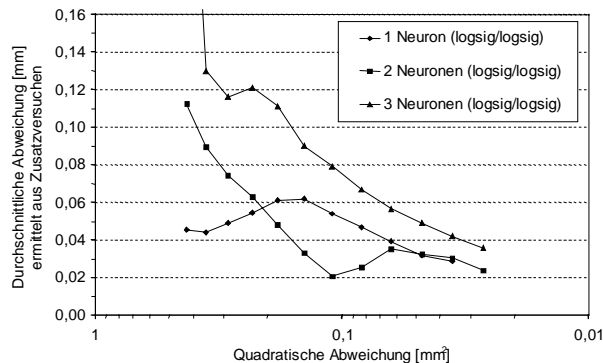
Ausgehend von diesem Fehler werden die Gewichtungen der Neuronen im Output- und Hidden-Layer verstellt. Anschließend wird dem Netz ein neues Eingabemuster bereitgestellt, eine Antwort hieraus berechnet und erneut ein Fehler gebildet. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis Output  $O$  und gewünschter Output  $t$  genügend nahe beieinander liegen und das Abbruchkriterium erreicht wird. Das Netz ist dann trainiert und steht für Vorhersagen zur Verfügung.

#### 4.2 Vorhersageergebnisse auf Basis ausgewählter neuronaler Netze

Bevor die ausgewählten Backpropagation-Netze mit den versuchsresultierenden Parameterwerten beaufschlagt werden können, müssen diese zunächst auf einen Wertebereich unter eins normiert werden. Um nach der Normierung den Trainingsvorgang zu starten, müssen die Anzahl der Neuronen und die anzuwendenden Aktivierungsfunktionen für die Neuronenschicht und die Ausgabe-schicht des Netzes festgelegt werden. In Vorversuchen hat sich gezeigt, daß besonders gute Ergebnisse mit ein bis drei Neuronen unter Anwendung von logsig-, tansig- und linearen Aktivierungsfunktionen sowie deren Kombinationen erzielt werden konnten. Trainingsversuche mit einer höheren Anzahl von Neuronen oder anderen Aktivierungsfunktionen, wie z.B. die Schwellwertfunktion, lieferten eher schlechte Ergebnisse.

Nun wird der elektrolytisch einseitig verzinkte DC 05 getestet. Hier liefert ein Backpropagation-Netz mit zwei Neuronen im Hidden-Layer und einer doppelten logsig-Aktivierung beste Ergebnisse (minimale Abweichung). **Bild 4.2** stellt die verschiedenen Netze gegenüber.

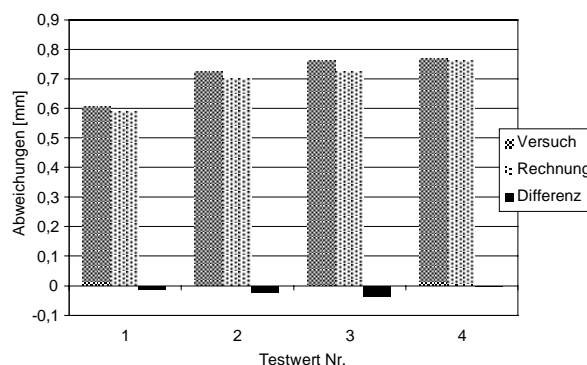
Die hier vorhergesagten Rückfederungen von Tiefziehteilen sind den neuronalen Netzen in den abgefragten Parameterkombinationen nicht „bekannt“. Im Gegensatz zu einer Datenbank greifen die trainierten Netze auf ihr „Erfahrungswissen“ zurück, um auf unbekannte Fertigungs- bzw. Konstruktionsfälle zu schließen und hier Vorhersagen zu treffen.



**Bild 4.2:** Vergleich der Backpropagationsnetze mit optimalen Aktivierungsfunktionen bei ein-, zwei und drei Neuronen

Allgemein muß zu oben stehendem Bild gesagt werden, daß die künstlichen neuronalen Netze in dieser Untersuchung zwischen 15 000 und 20 000 Iterationsschritten je durchgerechneter Startwertekombination bzw. je Reihe abarbeiten und nicht wie die einzelnen Punkte auf den Graphen vermuten lassen - nur 15 bis 20 Schritte. Der Übersichtlichkeit wegen wurden aber nur die Koordinatenwerte jedes tausendsten Iterationsschritts herausgeschrieben und zur Graphenbildung verwendet.

Die erzielte durchschnittliche Abweichung zwischen den durch das künstliche neuronale Netz und den durch Versuche ermittelten Ergebnissen liegt bei 0,0205 mm und kann damit als sehr gut eingestuft werden. **Bild 4.3** stellt diese Differenz graphisch dar.



**Bild 4.3:** Vergleich von Versuchs- und Rechnungswerten zufällig ausgewählter Parameterkombinationen

Das neuronale Netz ist auf jede beliebige Geometrie, also auch auf Freiformflächen, trainierbar.

Wichtig hierbei ist, daß das System auf eine bestimmte Tiefziehpresse „eintrainiert“ wird, also nicht für Pressen allgemein bzw. nicht einmal für Pressen gleicher Bauart Gültigkeit hat. So wie ein Relativkostenkatalog immer nur für ein einziges Unternehmen Gültigkeit hat, könnte man von einer „Relativrückfederungsvorhersage“ sprechen, da auch hier die gelieferten Daten allein für eine bestimmte Presse gelten. Nur mittels dieser Vorgehensweise ist es möglich, besondere Charakteristika von Pressen bzw. Störgrößen bei der Rückfederungsvorhersage zu berücksichtigen. Ist das neuronale Netz ausreichend trainiert, kann der Konstrukteur ohne weiteres Training mit dem System arbeiten. Erst bei der Änderung einer Vorgabe, also z.B. eines neuen Werkstoffs oder eines neuen Werkzeugs, muß das System neu eintrainiert werden. Die bis dahin vorliegenden Rückfederungsdaten können aber als Basis weiterverwendet werden und so den Trainingsvorgang für die neuen Vorgaben abkürzen.

## 5 Zusammenfassung

Um die dargestellte Vorgehensweise für die Praxis nutzbar zu machen, wird es im weiteren Verlauf notwendig sein, zusätzliche Tiefziehgeometrien zu trainieren. Insbesondere rotationssymmetrische Geometrien und Freiformflächen sollten ihre Anwendung finden. Als positiv in diesem Zusammenhang ist zu werten, daß mittels der hier erstellten Fallbasis zukünftig weitaus geringere Probenzahlen für neue Trainingsreihen notwendig sein werden. So wurden in dieser Arbeit drei unterschiedliche Werkstoffarten trainiert: ein unlegierter Stahl, ein höherfester Stahl und eine Aluminiumlegierung. Jede dieser Reihen zeigte ein ihr eigenes „Verhaltensmuster“. Trotzdem sind Bereiche der „Verhaltensmuster“ identisch oder mindestens ähnlich. Das künstliche neuronale Netz ist in der Lage, auf Basis einer geringen Probenzahl eines neuen Werkstoffs Analogien zu bereits in der Fallbasis enthaltenen Fertigungsfällen herzustellen und auf diese Weise eine Beurteilung zu ermöglichen. Hierfür müssen lediglich 30 bis 40 Versuche unter Variation der Parameter mit dem neuen Blech durchgeführt werden. Mittels der hieraus gewonnenen Rückfederungswerte und den „Erfahrungen“ bzw. Kenntnissen über die „Verhaltensmuster“ früherer Versuchswerkstoffe trifft das Netz für den neuen Werkstoff im Rahmen der angesprochenen Genauigkeiten Rückfederungsvorhersagen. Dabei ist durchaus auch eine gleichzeitige Änderung mehrerer Para-

meter möglich, also beispielsweise neuer Werkstoff und neuer Schmierstoff.

Ein Ausbau dieser Methodik hinsichtlich eines formfeature-basierten Ansatzes zur Erkennung, Klassifizierung und Kombination von Geometrie-merkmalen würde es weiterhin möglich machen, auch unbekannte Geometrien - aktuelle Konstruktions- und Fertigungsfälle - vorhersagen zu können. Es empfiehlt sich daher, dieses System an ein 3D-CAD-System zu koppeln.

Der Konstrukteur muß letztendlich durch solch ein Werkzeug in die Lage versetzt werden, an seinem Arbeitsplatz Rückfederungsdaten von gerade konstruierten Blechteilen abrufen und somit die Konstruktion entsprechend auslegen zu können.

Der Fertigungstechniker kann im Umkehrschluß dieses Tool nutzen, um festzustellen, wie er die Rückfederungswirkung eines vorliegenden Tiefziehwerkzeugs durch Änderungen von Parametereinstellungen beeinflussen kann.

Abschließend kann gesagt werden, daß sich die hier gewählte Vorgehensweise der Tiefziehidentifikation mittels künstlicher neuronaler Netze als sehr vielversprechend darstellt und daher zu einer intensiven Weiterverfolgung dieser Thematik berechtigt

## 6 Literaturverzeichnis

- /1/ König, W.: *Fertigungsverfahren*, VDI Verlag, Düsseldorf, 1990
- /2/ Kottmaier, J.: *Versuchplanung — Der Weg zur Qualität des Jahres 2000*, TÜV Rheinland Verlag, Zürich, 1990
- /3/ Hering, E.; Triemel, J.; Blank, H.-P.: *Qualitätssicherung für Ingenieure*, Springer Verlag, Düsseldorf, 1993
- /4/ Berns, K.; Kolb, T.: *Neuronale Netze für technische Anwendungen*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1994
- /5/ Blievernich, F.; Hartwig, W.; Hillert, F.; Hofmann, I.: *Assoziative Mustererkennung mit Hilfe neuronaler Netze*, Universität Bremen, Forschungsbericht, Bremen, (1990)