

FAT-Schriftenreihe 333

Charakterisierung und Meta-Modellierung von ungleichartigen
Punktschweißverbindungen für die Crashsimulation



Charakterisierung und Meta-Modellierung von ungleichartigen Punktschweißverbindungen für die Crashsimulation

Fraunhofer-Gesellschaft e.V.

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Forschungsleiter: Prof. Dr. Peter Gumbsch

Autoren: Lilia Schuster, Dr. Silke Sommer

Das im Folgenden dargestellte Forschungsprojekt

Charakterisierung und Meta-Modellierung von ungleichartigen Punktschweißverbindungen für die Crashsimulation

wurde gefördert von der gemeinnützigen Stiftung Stahlanwendungsforschung im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e.V.. Zweck der Stiftung ist die Förderung der Forschung auf dem Gebiet der Stahlverarbeitung und -anwendung in der Bundesrepublik Deutschland. Geprüft wurde das Forschungsvorhaben von einem Gutachtergremium der Forschungsvereinigung der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metall verarbeitenden Industrie e.V. (AVIF), das sich aus Sachverständigen der Stahl anwendenden Industrie und der Wissenschaft zusammensetzt.

Begleitet wurde das Projekt von einem Arbeitskreis der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT).

Der nachstehende Bericht fasst Zielsetzung und wichtigste Ergebnisse des Forschungsprojektes zusammen.

Kurzdarstellung

Im Automobilbau werden aus Leichtbaugründen verstärkt hoch- und höchstfeste Stähle in dünnen Blechdicken in einem funktions- und anforderungsoptimierten Materialmix eingesetzt. Um die einzelnen Bauteile zur tragenden Leichtbaustruktur zu verbinden, wird das sehr wirtschaftliche und hoch automatisierbare Widerstandspunktschweißen eingesetzt. Die Crashsimulation benötigt daher zuverlässige Modelle, die die Tragfähigkeit, also die maximal ertragbare Kraft, von Punktschweißverbindungen unterschiedlichster Fügepartner beschreiben können, um bereits in der Konzeptionsphase belastbare Aussagen über die Crashesicherheit und die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften treffen zu können.

In diesem Projekt wurden punktgeschweißte Proben einer umfangreichen Versuchsmatrix geprüft, um Einflussfaktoren wie Linsendurchmesser, Blechdicke und Stahleigenschaften auf die Tragfähigkeit bei ungleichartigen Verbindungen unter Kopfzug-, Scherzug- und Schälzugbelastung zu untersuchen. Ungleichartig bedeutet hier, dass unterschiedliche Stähle in unterschiedlichen Blechdicken geschweißt wurden. Die Versuchsmatrix umfasst hauptsächlich Zweiblech-, aber perspektivisch auch zwei Dreiblechverbindungen, da die Crashsimulation auch für Dreiblechverbindungen belastbare Modellvorhersagen benötigt.

Die Stahlblechkombinationen wurden so gewählt, wie sie typischerweise in der Automobilindustrie verwendet werden. Die Beteiligung von pressgehärtetem Stahl 22MnB5 führt zu einer Mischbruchneigung (anteilige Bruchfläche in der Fügeebene) unter Normalbelastung, also hier in Kopfzug- und Schälzugversuchen. Trotz der hohen Zugfestigkeit von 22MnB5 ist der Versagensort auch bei Paarungen mit niederfesteren Stählen der gleichen Blechdicken im 22MnB5 Blech. Unter Scherzugbelastung wird ein linearer Anstieg der Maximalkraft über den Linsendurchmesser beobachtet, und sie steigt außerdem mit der Blechdicke des zweiten Fügepartners an. Auch unter Kopfzugbelastung steigt die Maximalkraft mit zunehmendem Linsendurchmesser an und ist höher, je dicker das Blech des zweiten Fügepartners ist. Die zwei Dreiblechverbindungen wurden unter Scherzug-, Kopfzug und Schälzugbelastung jeweils mit verschiedenen Lasteinleitungen geprüft. Die niedrigsten Maximalkräfte wurden hier gemessen, wenn das obere Blech gegen das untere Blech gezogen wurde, da dabei beide Fügeebenen gleichzeitig belastet wurden.

Maschinelles Lernen wird bereits erfolgreich in Bereichen eingesetzt, in denen die Erfassung großer Datenmengen leicht zu bewältigen ist. Im ingenieurwissenschaftlichen Bereich ist aufgrund der Komplexität und des Materialaufwands für experimentelle Untersuchungen die Datenerhebung im großen Umfang oft erschwert. Aber inzwischen ist die Menge der Daten aus Literatur und Datenbanken groß, so dass mit Methoden des maschinellen Lernens ein umfangreicherer Nutzen daraus gezogen werden kann. Mit Maschinenlernen können Zusammenhänge aufgedeckt und in mathematische Form gebracht werden, die nur bei Zusammenführung großer Datenmengen ersichtlich sind.

In diesem Projekt wurden mithilfe von Verfahren des maschinellen Lernens Modelle zur Vorhersage der Tragfähigkeit unter quasi-statischer Belastungsgeschwindigkeit von ungleichartigen, punktgeschweißten Zweiblechverbindungen unter Scher-, Kopf- und Schälzugbelastung entwickelt. Dabei wurden Effekte, die durch Streuungen der tragfähigkeitsbestimmenden Größen, wie z.B. Linsendurchmesser, Blechdicken und Festigkeit der Stahlbleche, hervorgerufen werden, analysiert und berücksichtigt. Die Regressionsmodelle wurden anhand von Versuchsergebnissen von gleichartigen Verbindungen erstellt und können im Wesentlichen den Einfluss des Linsendurchmessers, Blechdicke und Zugfestigkeit auf die Tragfähigkeit wiedergeben. Der Vergleich der Modelle mit experimentellen Datenpunkten für gleichartige Verbindungen zeigt eine gute Anpassung. Zur Übertragung der Modelle auf ungleichartige Verbindungen wurde ein Minimumansatz der Tragfähigkeiten für die gleichartigen Verbindungen der jeweiligen Fügepartner gewählt. Dieser Minimumansatz kann die Tragfähigkeit einer ungleichartigen Punktschweißverbindung unter Scherzugbelastung gut beschreiben, für Kopfzug- und Schälzugbelastung wurden zusätzliche Korrekturfaktoren benötigt, da die ungleichartigen Verbindungen kleinere Maximalkräfte aufweisen als eine gleichartige Verbindung des niederfesteren und/oder dünneren Blechs.

Zusammenfassend betrachtet sind die Regressionsmodelle geeignet, um Vorhersagen für die Maximalkraft von Punktschweißverbindungen unter verschiedenen Belastungsarten zu treffen. Die Qualität der Vorhersage wird jedoch durch die Qualität und Quantität der Eingangsdaten bestimmt. Eine gleichmäßige Verteilung der Kombinationen, sowie eine breite Abdeckung des Parameterraumes wirken sich positiv auf die Vorhersagegüte der Modelle aus.

Inhaltsverzeichnis

1	Symbole und Abkürzungen	9
1.1	Symbole	9
1.2	Abkürzungen	9
2	Einleitung.....	10
3	Experimentelle Untersuchungen	11
3.1	Versuchsmatrix.....	11
3.1.1	Versuchsaufbau	14
3.1.2	Probenfertigung der Versuchsmatrix	16
3.2	Experimentelle Ergebnisse der Scherzugversuche	20
3.2.1	Versuchsreihe 1a.....	20
3.2.2	Versuchsreihe 1b.....	24
3.2.3	Versuchsreihe 1c.....	26
3.2.4	Zusammenfassung der Scherzugversuche	27
3.3	Experimentelle Ergebnisse der Kopfzugversuche	28
3.3.1	Versuchsreihe 1a.....	28
3.3.2	Versuchsreihe 1b.....	32
3.3.3	Versuchsreihe 1c.....	34
3.3.4	Zusammenfassung der Kopfzugversuche	36
3.4	Experimentelle Ergebnisse der Schälzugversuche	37
3.4.1	Versuchsreihe 1a.....	37
3.4.2	Versuchsreihe 1b.....	40
3.4.3	Versuchsreihe 1c.....	42
3.4.4	Zusammenfassung der Schälzugversuche	44
3.5	Experimentelle Ergebnisse der gleichartigen Schälzugversuche	45
3.5.1	Versuchsreihe 2.....	45
3.6	Experimentelle Ergebnisse der Dreiblechverbindungen	47
3.6.1	Versuchsreihe 3.....	47
3.6.2	Versuchsreihe 4.....	51
3.6.3	Zusammenfassung Dreiblechverbindungen	54
3.7	Unterschiedliche Charakteristik im Bruchverhalten bei Scherzugversuchen	55
4	Modellerstellung	60
4.1	Ansatz für ungleichartige Verbindungen	60
4.1.1	Scherzug.....	60
4.1.2	Kopfzug.....	61
4.2	Modellerstellung mit Ridge Regression	61
4.2.1	Auswahl der Merkmale	62
4.2.2	Lineare Regressionsverfahren	63
4.2.3	Hyperparameter und Kreuzvalidierung	64
4.2.4	Programmablauf	66
4.3	Datenbereinigung	67
4.4	Künstliche Randwerte	70
4.4.1	Künstliche Werte für die Untergrenze	70
4.4.2	Ermittlung einer Obergrenze für Scherzugversuche	70
4.5	Scherzug-Modell.....	73
4.5.1	Datenauswahl.....	74
4.5.2	Plausibilitätsanalyse	74
4.5.3	Übertragung auf ungleichartige Verbindungen	77
4.6	Kopfzug-Modell.....	83
4.6.1	Datenauswahl.....	83
4.6.2	Plausibilitätsanalyse	85

4.6.3	Übertragung auf ungleichartige Verbindungen	87
4.6.4	Korrekturfaktor für ungleichartige Verbindungen mit deutlich unterschiedlichem Deformationsverhalten	91
4.7	Schälzug-Modell	94
4.7.1	Datenauswahl	94
4.7.2	Plausibilitätsanalyse	96
4.7.3	Korrekturfaktor für ungleichartige Verbindungen unter Schälzugbelastung.....	98
4.7.4	Übertragung auf ungleichartige Verbindungen	100
5	Zusammenfassung	104
6	Literatur	107

1 Symbole und Abkürzungen

1.1 Symbole

Symbol	Units	Description
t_1	mm	Blechdicke 1
d_L	mm	Linsendurchmesser
d_p	mm	Punktdurchmesser
t_{min}	mm	Kleinste Blechdicke in einer Verbindung
F_{max}	kN	Maximalkraft / Tragfähigkeit der Verbindung
w_j		j-tes Gewicht des Polynoms
$y^{(i)}$		Wahrer Wert
$\hat{y}^{(i)}$		Vorhergesagte Wert der Zielvariable
$\bar{y}^{(i)}$		Arithmetische Mittelwert der vorhergesagten Zielvariablen
R^2		Bestimmtheitsmaß
λ		Regularisierungsfaktor der Ridge Regression
n		Polynomgrad

1.2 Abkürzungen

WEZ	W ärme e influss z one
EWZ	E rweichungs z one
FEM	F inite E lemente M ethode
AB_1	Ausknöpfungbruch aus Blech 1
AB_2	Ausknöpfungbruch aus Blech 2
FE	Fügeebenenbruch
MB_1	Mischbruch aus Blech 1
MB_2	Mischbruch aus Blech 2
AB_1,2	Beidseitiger Ausknöpfungbruch zuerst aus Blech 1 und dann aus Blech 2
AB_2,1	Beidseitiger Ausknöpfungbruch zuerst aus Blech 2 und dann aus Blech 1
LsB_1	Laschenbildung in Blech 1
LsB_2	Laschenbildung in Blech 2
LB_1	Linsengrenzbruch aus Blech 1
LB_2	Linsengrenzbruch aus Blech 2
MSE	M ean S quared E rror (Mittlere quadratische Abweichung)
DP600	Stahl HCT600XD
DP800	Stahl HCT780XD
DP1000	Stahl HCT980XD
GLD	G ologanu- L eb l ond- D e v aux
WPS	W iderstandspunkt s chweißen

2 Einleitung

Im Automobilbau werden aus Leichtbaugründen verstärkt hoch und höchstfeste Stähle in dünnen Blechdicken in einem funktions- und anforderungsoptimierten Multi-Materialmix eingesetzt. Um die einzelnen Bauteile zur tragenden Leichtbaustruktur zu verbinden, wird das sehr wirtschaftliche und hoch automatisierbare Widerstandspunktschweißen eingesetzt. Die Crashesimulation benötigt daher zuverlässige Modelle, die die Tragfähigkeit von Punktschweißverbindungen unterschiedlichster Fügepartner in ungleichartigen Verbindungen beschreiben können, um bereits in der Konzeptionsphase belastbare Aussagen über die Crashesicherheit und die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften treffen zu können.

Maschinelles Lernen wird bereits erfolgreich in Bereichen eingesetzt, in denen die Erfassung großer Datenmengen leicht zu bewältigen ist. Im naturwissenschaftlichen Bereich ist aufgrund von Komplexitäts- und Materialaufwand für experimentelle Untersuchungen die Datenerhebung oft erschwert. Darüber hinaus besteht häufig die Anforderung, die zu Phänomenen führenden physikalischen Zusammenhänge und die zugrundeliegenden Naturgesetzmäßigkeiten zu beschreiben. Das maschinelle Lernen fand daher nur zögerlich im naturwissenschaftlichen Bereich Einzug. Aber auch in der Forschung ist die Menge der Daten aus Literatur und Datenbanken mittlerweile so groß, dass nur mit Methoden des maschinellen Lernens der volle Nutzen daraus gezogen werden kann. Mit Maschinenlernen können Zusammenhänge aufgedeckt und in mathematische Form gebracht werden, die nur bei Zusammenführung großer Datenmengen ersichtlich sind.

In diesem Projekt soll mithilfe von Verfahren des maschinellen Lernens eine Methodik entwickelt werden, um die Tragfähigkeit für ungleichartige Punktschweißverbindungen vorherzusagen. Dabei sollen Effekte, die durch Streuungen der tragfähigkeitsbestimmenden Größen, wie z.B. Linsendurchmesser, Blechdicken und Festigkeiten der Fügepartner, hervorgerufen werden, analysiert und berücksichtigt werden.

3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 Versuchsmatrix

Die wesentlichen Untersuchungen zur Abhängigkeit von Festigkeitspaarungen, Blechdickenvariation und Linsendurchmesser werden mithilfe der Versuchsreihen 1a, 1b und 1c vorgenommen. Dazu wird in den Versuchsreihen 1a und 1b der Presshärtstahl 22MnB5 in 1,5 mm Blechdicke mit Dualphasenstahl in unterschiedlichen Festigkeitsklassen und unterschiedlichen Blechdicken kombiniert. Für jede Kombination wird der Linsendurchmesser zusätzlich variiert.

Der Presshärtstahl 22MnB5 gehört zu der Stahlklasse mit der höchsten Festigkeit, die derzeit im Fahrzeugbau zum Einsatz kommen. Aufgrund der hohen Tragfähigkeit unter schlagartiger Belastung findet 22MnB5 in Karosseriestrukturen Anwendung.

Dualphasenstahl wiederum zeichnet sich durch eine niedrige Streckgrenze bei gleichzeitig hoher Zugfestigkeit aus. Dadurch ist eine gute Umformbarkeit gewährleistet. Die Bezeichnung rührt aus der Mikrostruktur des Werkstoffs. Dualphasenstähle besitzen ein Gefüge aus einer ferritischen und einer martensitischen Phase.

Für die Materialkombination in Versuchsreihe 1c wurden der Dualphasenstahl HCT780XD in 1,5 mm Blechdicke und der Weichstahl DC04 in 1 mm Blechdicke gewählt. Weichstähle werden als Außenhaut der Karosserie eingesetzt. Sie haben keine tragenden Eigenschaften.

Versuchsreihe	Blech 1	t_1 [mm]	Blech 1	t_2 [mm]	Linsendurchmesser
1a-1	22MnB5	1,5	HCT780XD	1,0	dL_{min}
1a-2	22MnB5	1,5	HCT780XD	1,0	dL_{max}
1a-3	22MnB5	1,5	HCT780XD	1,0	$0,5(dL_{max} - dL_{min})dL_{min}$
1a-4	22MnB5	1,5	HCT780XD	1,5	dL_{min}
1a-5	22MnB5	1,5	HCT780XD	1,5	dL_{max}
1a-6	22MnB5	1,5	HCT780XD	1,5	$0,5(dL_{max} - dL_{min})dL_{min}$
1a-7	22MnB5	1,5	HCT780XD	2,0	dL_{min}
1a-8	22MnB5	1,5	HCT780XD	2,0	dL_{max}
1a-9	22MnB5	1,5	HCT780XD	2,0	$0,5(dL_{max} - dL_{min})dL_{min}$
1a-10	22MnB5	1,5	HCT780XD	1,3	$0,25(dL_{max} - dL_{min})dL_{min}$
1a-11	22MnB5	1,5	HCT780XD	1,3	$0,75(dL_{max} - dL_{min})dL_{min}$
1a-12	22MnB5	1,5	HCT780XD	1,8	$0,25(dL_{max} - dL_{min})dL_{min}$
1a-13	22MnB5	1,5	HCT780XD	1,8	$0,75(dL_{max} - dL_{min})dL_{min}$
1a-14	22MnB5	1,5	HCT780XD	1,5	$0,25(dL_{max} - dL_{min})dL_{min}$
1a-15	22MnB5	1,5	HCT780XD	1,5	$0,75(dL_{max} - dL_{min})dL_{min}$

Tabelle 1 Versuchsmatrix mit Soll-Werten für den Schweißlinsendurchmesser für Versuchsreihe 1a

Die untersuchten Versuchsreihen und Soll-Werte der Variationen für den Linsendurchmesser sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 aufgeführt. Jede dieser Kombinationen wurde unter Scher-, Kopf- und Schälzugbelastung geprüft. Bei der Anfertigung von Schlifflinien an gebrochenen Proben zeigte sich, dass der angestrebte Linsendurchmesser nicht immer genau hergestellt werden konnte. Außerdem unterscheiden sich die Linsendurchmesser abhängig von der Probengeometrie trotz gleicher Schweißparametereinstellungen. Auch innerhalb einer Versuchsreihe zeigten sich leichte Schwankungen im Linsendurchmesser.

Versuchsreihe	Blech 1	t_1 [mm]	Blech 2	t_2 [mm]	Linsendurchmesser
1b-1	22MnB5	1,5	HCT600XD	1,5	dL_{min}
1b-2	22MnB5	1,5	HCT600XD	1,5	dL_{max}
1b-3	22MnB5	1,5	HCT600XD	1,5	$0,5(dL_{max} - dL_{min})dL_{min}$
1b-4	22MnB5	1,5	HCT980XD	1,5	dL_{min}
1b-5	22MnB5	1,5	HCT980XD	1,5	dL_{max}
1b-6	22MnB5	1,5	HCT980XD	1,5	$0,5(dL_{max} - dL_{min})dL_{min}$
1b-7	22MnB5	1,5	HCT600XD	1,5	$0,25(dL_{max} - dL_{min})dL_{min}$
1b-8	22MnB5	1,5	HCT980XD	1,5	$0,75(dL_{max} - dL_{min})dL_{min}$
1c-1	HCT780XD	1,5	DC04	1,0	dL_{min}
1c-2	HCT780XD	1,5	DC04	1,0	dL_{max}
1c-3	HCT780XD	1,5	DC04	1,0	$0,5(dL_{max} - dL_{min})dL_{min}$
1c-4	HCT780XD	1,5	DC04	1,0	$0,25(dL_{max} - dL_{min})dL_{min}$
1c-5	HCT780XD	1,5	DC04	1,0	$0,75(dL_{max} - dL_{min})dL_{min}$

Tabelle 2 Versuchsmatrix mit Soll-Werten für den Schweißlinsendurchmesser für Versuchsreihen 1b und 1c

Zur vollständigen Charakterisierung einer Punktschweißverbindung ist die Bestimmung der Tragfähigkeit unter verschiedenen Belastungsarten notwendig. Mit Kopfzugproben kann die Tragfähigkeit der Verbindung unter Normalbelastung bestimmt werden. Scherzugproben dienen zur Bestimmung der Tragfähigkeit unter Scherbelastung. Bei der Prüfung von Schälzugproben wird eine Biegebelastung auf die Verbindung aufgebracht. Unter Biegebelastung ist die Tragfähigkeit einer Punktschweißverbindung in der Regel deutlich niedriger als unter Scher- und Normalbelastung. In der vorliegenden Datenbank lagen nur wenige Datensätze für Schälzugversuche vor. Daher wurde eine zusätzliche Versuchsreihe in das Versuchsprogramm aufgenommen. In Versuchsreihe 2 wurden ausschließlich gleichartige Verbindungen mit 22MnB5 unter Biegebelastung getestet. Variiert wurden Blechdicke und Linsendurchmesser (Tabelle 3).

Versuchsreihe	Blech 1	t_1 [mm]	Blech 2	t_2 [mm]	Linsendurchmesser [mm]
2-1	22MnB5	1,0	22MnB5	1,0	5,5 [entspricht dL_{max}]
2-2	22MnB5	1,0	22MnB5	1,0	4,8 [entspricht $0,5(dL_{max} - dL_{min})dL_{min}$]
2-3	22MnB5	2,0	22MnB5	2,0	4,0 [entspricht dL_{min}]
2-4	22MnB5	1,5	22MnB5	1,5	5,5 [entspricht $0,5(dL_{max} - dL_{min})dL_{min}$]

Tabelle 3 Versuchsmatrix mit Soll-Werten für den Schweißlinsendurchmesser für Versuchsreihe 2

Im Karosseriebau werden auch Punktschweißverbindungen eingesetzt, die drei Bleche miteinander verbinden. Zwei solcher Dreiblechverbindungen wurden in Versuchsreihe 3 und 4 geprüft. In Versuchsreihe 4 werden Material-/Blehdickenkombinationen eingesetzt, analog zu den Zweiblechverbindungen in Versuchsreihe 1a bzw. 1c (Tabelle 4). Für die Dreiblechverbindungen wird zusätzlich zur Belastungsart (Scherzug, Kopfzug, Schälzug) auch der Lasteinleitungsfall variiert. Die verschiedenen Lasteinleitungsfälle sind in Tabelle 10 aufgeführt.

Versuchsreihe	Blech 1	t_1 [mm]	Blech 2	t_2 [mm]	Blech 3	t_3 [mm]	dL_{12} [mm]	dL_{23} [mm]
3	HCT980XD	1,5	HCT600XD	1,5	HCT600XD	1,5	6,8	6,8
4	22MnB5	1,5	HCT780XD	1,5	DC04	1,5	6,9	5,2

Tabelle 4 Versuchsmatrix mit Soll-Werten für den Schweißlinsendurchmesser für Versuchsreihe 3 und 4

3.1.1 Versuchsaufbau

Die Geometrie der Scherzugproben entspricht den Vorgaben in DIN EN ISO 14273. Die beiden Blechstreifen mit den Maßen 45 mm x 105 mm werden mit einem Überlapp von 16 mm zusammengeschweißt. Die Fügestelle wird mittig auf der Probe positioniert. Die Probengeometrie der Scherzugproben ist in Bild 1 abgebildet.

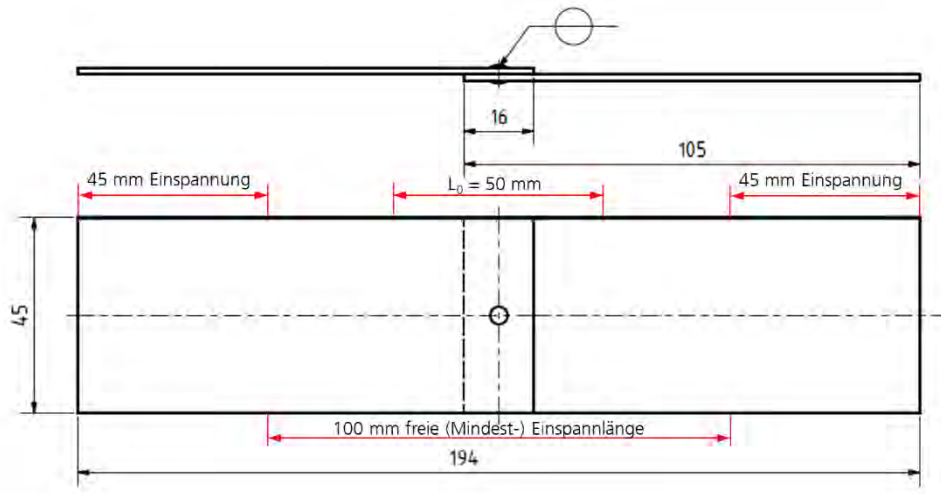


Bild 1
Geometrie der Scherzugprobe

Die Proben wurden hydraulisch eingespannt, so dass eine flächige Klemmung stattfand. Diese Art der Einspannung wurde für die vorliegenden Versuche der Einspannung mit Lochbild vorgezogen, um ein Ausreißen aus dem Lochbild bei dünnen Blechen aus weichem Stahl zu verhindern. Die Scherzugproben wurden in der Zugprüfmaschine vom Typ Instron 8852TT geprüft. Die verwendete Kraftmessdose hat einen Messbereich bis 100kN. Es wurden zusätzliche Ausgleichbleche im Einspannbereich eingebracht, um keine zusätzliche Biegebelastung auf die Fügestelle aufzubringen. Der Versuchsaufbau mit eingespannter Probe und angebrachtem Clipgauge ist in Bild 2 dargestellt.

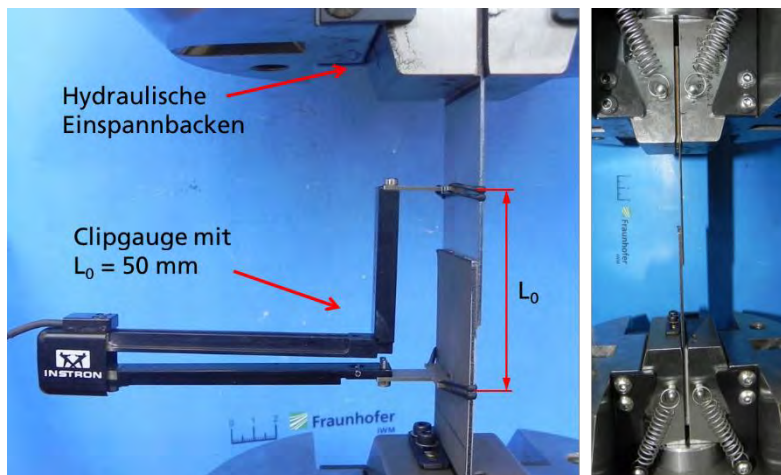


Bild 2
Versuchsaufbau zur Prüfung der Scherzugproben

Für die Kopfzugbelastung wurde die maximale Tragfähigkeit mithilfe der am LWF entwickelten LWF-KS-2-Probe getestet. Die Probe besteht aus zwei U-Profilen (Bild 3). Für alle Materialkombinationen wurde eine Innenweite von 34 mm gewählt. Die Länge der Probe beträgt 50 mm. Für die Bestimmung der maximalen Tragfähigkeit unter Schälzugbelastung wird die Probe statt mit einem U-Profil mit einem L-Profil realisiert.

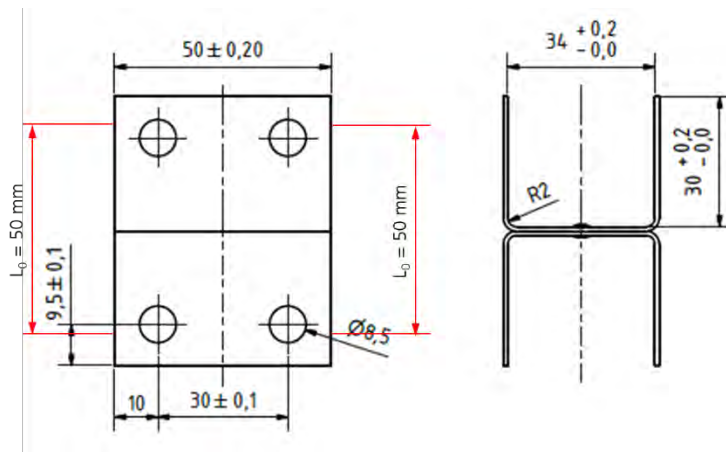


Bild 3
Geometrie der verwendeten LWF-KS-2-Probe

Der Versuchsaufbau für die Kopfzugproben ist in Bild 4 dargestellt. Die Proben wurden an der Zugprüfmaschine vom Typ Hegerwald+Peschke 250 geprüft. Die verwendete Kraftmessdose hat einen Messbereich bis 250 kN. Die Wegmessung wurde mit zwei Clipgauge Wegaufnehmern realisiert. Damit konnte sichergestellt werden, dass ein eventuelles Kippen der Kopfzugprobe die Wegmessung nicht beeinflusst. Zur Auswertung der Wegmessung wurde der Mittelwert der beiden Clipgauge Messungen berechnet. Über den Mittelwert kann sichergestellt werden, dass die gemessene Wegmessung die Deformation an der Fügestelle widerspiegelt. In den Versuchsreihen 1a, 1b und 1c wurden in der Regel fünf Wiederholversuche durchgeführt.

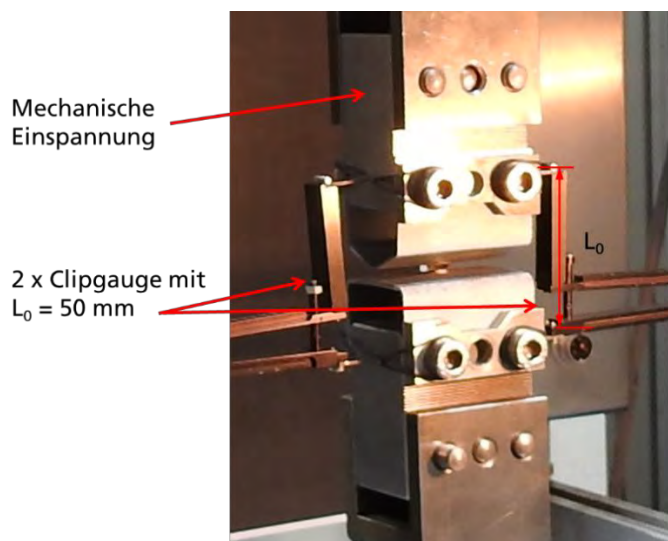


Bild 4
Versuchsaufbau zur Prüfung der Kopfzugproben

Alle Proben wurden unter quasistatischer Belastung getestet. Das heißt die Versuche wurden weggeregelt mit einer Geschwindigkeit von 0,01 mm/s – 0,08 mm/s durchgeführt.

Die Proben der Versuchsreihe 3 wurden an der Zugprüfmaschine INSTRON 5985 geprüft. Hier wurden sowohl für die Kopf- und Schälzugproben als auch die Scherzugproben eine Einspannung mit Lochbild vorgenommen. Versuchsreihe 4 wurde analog zur Versuchsreihe 1 nach Belastungsart aufgeteilt und auf unterschiedlichen Maschinen getestet. Die Scherzugproben wurden hydraulisch eingespannt an der Zugprüfmaschine INSTRON 8802. Die verwendete Kraftmessdose hatte einen Messbereich bis 100 kN. Die Kopfzug- und Schälzugproben wurden mechanisch eingespannt und mit einer Kraftmessdose bis 250 kN Messbereich an der Zugprüfmaschine Hegerwald+Peschke 250 getestet. In den Versuchsreihen 3 und 4 wurden jeweils drei Wiederholversuche durchgeführt.

3.1.2 Probenfertigung der Versuchsmatrix

In der ursprünglichen Projektplanung war vorgesehen, alle Schweißungen der Versuchsmatrix am Fraunhofer IWM zu realisieren. Aufgrund von Kapazitätsengpässen und Verzögerungen in der Inbetriebnahme der Anlage, wurde entschieden die Herstellung der Punktschweißungen extern zu beauftragen. Die Proben der Versuchsreihen 1a, 1b und 1c wurden an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus hergestellt. Die Proben der Versuchsreihen 2, 3 und 4 wurden am Laboratorium für Werkstoff- und Fügechnik (LWF) in Paderborn geschweißt.



Bild 5
Positionierhilfe zur Fertigung der Kopf- und Schälzugproben

Für die Material-/Blehdickenkombinationen (MBK) der Versuchsreihen 1a, 1b, 1c wurde jeweils der Schweißbereich in Anlehnung an SEP1220 mit $d_{Lmin} = 4 \cdot \sqrt{t_{min}}$ und d_{Lmax} (Spritzergrenze) ermittelt. Bis auf die Kombinationen 22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (1,3 mm) und 22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (1,8 mm) wurde für alle Kombinationen der Linsendurchmesser der unteren Grenze und der oberen Grenze geschweißt. Der Soll-Linsendurchmesser von $4 \cdot \sqrt{t_{min}}$ konnte nicht für jede Schweißverbindung realisiert werden. Teilweise musste ein etwas größerer Linsendurchmesser verwendet werden um zu verhindern, dass Schweißfehler auftraten. Der minimale Schweißstrom wurde um 0,2 kA angehoben. Insbesondere sollte dadurch vermieden werden, dass die Bleche nur anhaften und ohne eine Aufschmelzung gefügt sind.

Versuchsreihe	Vorhalte-		Vorwärm-		Wärme-	Schweiß-	Schweiß-	Elektro-	Nachhalte-
	kraft	zeit	strom	zeit	ausgleichs	strom	zeit	denkraft	zeit
	kN	ms	kA	ms	zeit	kA	ms	kN	ms
1a-1	4	200	2,5	120	40	5,5	420	4	200
1a-2	4	200	2,5	120	40	6,8	420	4	200
1a-3	4	200	2,5	120	40	6,25	420	4	200
1a-4	4,3	200	2,5	140	40	5,35	500	4,3	200
1a-5	4,3	200	2,5	140	40	7,8	500	4,3	200
1a-6	4,3	200	2,5	140	40	6,25	500	4,3	200
1a-7	4,3	200	2,5	140	40	5,6	500	4,3	200
1a-8	4,3	200	2,5	140	40	7,6	500	4,3	200
1a-9	4,3	200	2,5	140	40	6,4	500	4,3	200
1a-10	4,1	200	2,5	120	40	5,7	500	4,1	200
1a-11	4,1	200	2,5	120	40	6,8	500	4,1	200
1a-12	4,3	200	2,5	140	40	6	500	4,3	200
1a-13	4,3	200	2,5	140	40	6,8	500	4,3	200
1a-14	4,3	200	2,5	140	40	5,8	500	4,3	200
1a-15	4,3	200	2,5	140	40	7,0	500	4,3	200

Tabelle 5 Schweißparameter der Versuchsreihe 1a

Zur Umsetzung der mittigen Positionierung des Schweißpunkts auf den Kopf- und Schälzugproben wurden Positionierhilfen gefertigt (Bild 5). Ein zusätzlicher Anschlag wurde verwendet, um die obere und untere Probenhälften zu zentrieren. Trotz der verwendeten Positionierhilfen kann es zu Lageverschiebungen kommen. Ursachen sind das Schieben der Elektroden, hohe Elektrodenkräfte und gleichzeitig hohe Erwärmung der Beschichtungen. Ein festes Einspannen der Proben ist aufgrund der Wärmedehnung nicht möglich. Bei der Fertigung wurde immer auf ein einheitliches Einlegen der Probenhälften geachtet. Für die Versuchsreihen 1a und 1b wurde 22MnB5 immer der Kathode und der Dualphasenstahl der Anode zugewandt. Für Versuchsreihe 1c wurde HCT780XD der Kathode und DC04 der Anode zugewandt.

Versuchsreihe	Vorhalte-		Vorwärm-		Wärmeausgleichszeit ms	Schweißstrom kA	Schweißzeit ms	Elektrodenkraft kN	Nachhaltezeit ms
	kraft	zeit	strom	zeit					
	kN	ms	kA	ms					
1b-1	4,3	200	2,5	140	40	5,9	500	4,3	200
1b-2	4,3	200	2,5	140	40	8,3	500	4,3	200
1b-3	4,3	200	2,5	140	40	7,1	500	4,3	200
1b-4	4,3	200	2,5	140	40	5,7	500	4,3	200
1b-5	4,3	200	2,5	140	40	8,0	500	4,3	200
1b-6	4,3	200	2,5	140	40	6,7	500	4,3	200
1b-7	4,3	200	2,5	140	40	6,5	500	4,3	200
1b-8	4,3	200	2,5	140	40	7,4	500	4,3	200

Tabelle 6 Schweißparameter der Versuchsreihe 1b

Versuchsreihe	Vorhalte-		Vorwärm-		Wärmeausgleichszeit ms	Schweißstrom kA	Schweißzeit ms	Elektrodenkraft kN	Nachhaltezeit ms
	kraft	zeit	strom	zeit					
	kN	ms	kA	ms					
1c-1	4,3	200	2,5	120	40	6,0	420	4,0	200
1c-2	4,3	200	2,5	120	40	8,5	420	4,0	200
1c-3	4,3	200	2,5	120	40	7,6	420	4,0	200
1c-4	4,3	200	2,5	120	40	6,8	420	4,0	200
1c-5	4,3	200	2,5	120	40	8,0	420	4,0	200

Tabelle 7 Schweißparameter der Versuchsreihe 1c

Die Dreiblechverbindung in Verbindung 3 ist symmetrisch in der Blechdicke und unsymmetrisch im Material. Die Fertigung wurde am LWF durchgeführt. Die verwendeten Schweißparameter sind in Tabelle 8 aufgeführt. Es wurde die Kombination HCT980XD (1,5 mm) – HCT600XD (1,5 mm) – HCT600XD (1,5 mm) gefertigt. Zusätzlich wurden Zweiblechverbindungen gefertigt mit einem ähnlichen Linsendurchmesser. Der Linsendurchmesser der Dreiblechverbindung ist in beiden Fügeebenen gleich. Für die Zweiblechverbindungen wurden nur Scherzugproben getestet. Für die Dreiblechverbindung wurden vier unterschiedliche Lasteinleitungsfälle für die Belastungsarten Kopfzug- und Schälzug realisiert. Für Scherzug wurden insgesamt fünf Lasteinleitungsfälle umgesetzt (Tabelle 10).

	Versuchsreihe 3	Zusätzliche Referenzschweißungen	
	Dreiblechverbindung HCT980XD – HCT600XD – HCT600XD	Zweiblechverbindung HCT980XD – HCT600XD	Zweiblechverbindung HCT600XD – HCT600XD
Schweißzeit in ms	300 / 380 / 300	300 / 360 / 300	300 / 360 / 300
Schweißstrom in kA	9	8,4	8,8
Elektrodenkraft in kN	4,5 / 4,5 / 4,5	4,5 / 4,5 / 4,5	4,5 / 4,5 / 4,5

Tabelle 8 Schweißparameter der Versuchsreihe 3 und für zusätzliche Referenzschweißungen

Bei Verbindung 4 handelt es sich um eine weitere Dreiblechverbindung. Auch diese Verbindung wurde am LWF geschweißt mit der Kombination 22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (1,5 mm) – DC04 (1,0 mm). Ziel war es in beiden Fügeebenen Schweißlinsendurchmesser herzustellen, die ausgewählten Zweiblechverbindungen aus den Versuchsreihen 1a bzw. 1c entsprechen. Die resultierende Verbindung hat in der oberen Fügeebene einen Linsendurchmesser von 6,9 mm und in der unteren Fügeebene einen Linsendurchmesser von 5,2 mm. Die Schweißparameter für diese Verbindung sind in Tabelle 9 aufgeführt.

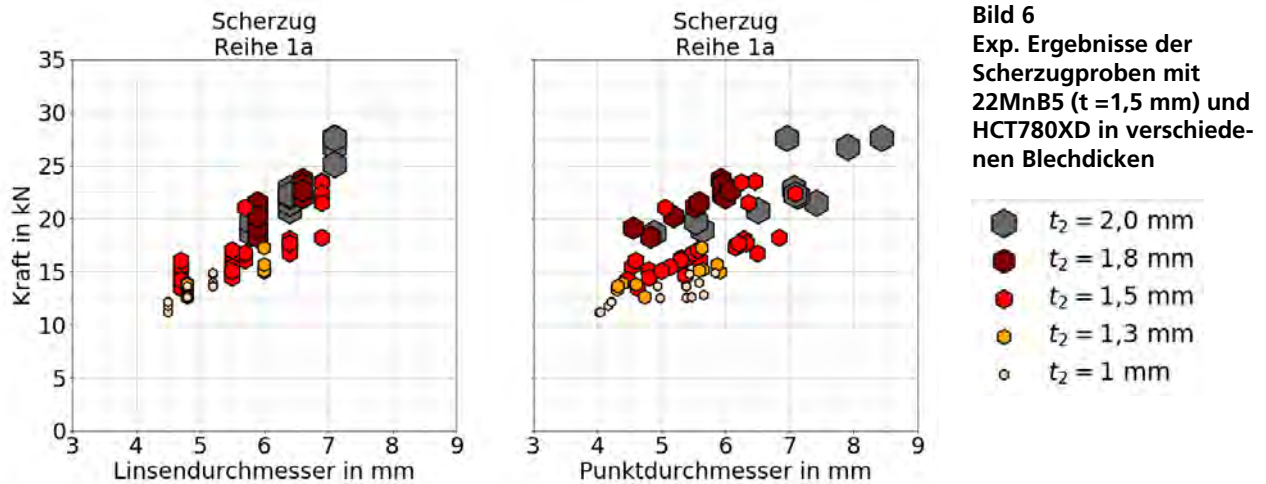
	Versuchsreihe 4
	Dreiblechverbindung 22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (1,5 mm) – DC04 (1,0 mm)
Schweißzeit in ms	210 / 360 / 180
Schweißstrom in kA	8,2
Elektrodenkraft in kN	4,5 / 4,5 / 4,5

Tabelle 9 Schweißparameter der Versuchsreihe 4

3.2 Experimentelle Ergebnisse der Scherzugversuche

3.2.1 Versuchsreihe 1a

Die experimentellen Ergebnisse für die Scherzugproben Versuchsreihe 1a sind in Bild 6 grafisch dargestellt.



Auf der linken Seite in Bild 6 ist die Maximalkraft über den nominellen Linsendurchmesser dargestellt. Auf der rechten Seite ist anstelle des Linsendurchmessers der Punktdurchmesser dargestellt. Der nominelle Linsendurchmesser wurde aus der Schweißbereichsermittlung übernommen und stichpunktartig anhand von Schliffen ergänzt und korrigiert. Dabei wurde die angebundene Fläche in der Fügeebene gemessen. Der Punktdurchmesser ist die Abschätzung des Linsendurchmessers anhand der Bruchfläche. Für Versuche die unter Scherzug aus 22MnB5 ausgeknöpft sind, sind Punktdurchmesser und Linsendurchmesser annähernd identisch. In Versuchsreihe 1a-8 sind die Proben entlang der Erweichungszone ausgeknöpft. Dabei handelt es sich um die drei Versuche mit der höchsten Maximalkraft (>25 kN). Hier ist zu erwarten, dass der gemessene Punktdurchmesser größer ist als der nominelle Linsendurchmesser (Bild 11). Je dicker das HCT780XD Blech ist, desto größer ist der maximale Linsendurchmesser. Für die Blechdicken 1,3 mm und 1,8 mm wurde kein maximaler Linsendurchmesser geschweißt. Innerhalb der einzelnen Blechdickenkombinationen steigt die Maximalkraft mit wachsendem Linsendurchmesser linear an.

In den Versuchsreihen 1a-1 ($d_L = 4,5$ mm), 1a-2 ($d_L = 5,2$ mm) und 1a-3 ($d_L = 4,8$ mm) wurde das Blech 22MnB5 (1,5 mm) mit einem Blech HCT780XD der Blechdicke 1 mm verschweißt. Die experimentellen Ergebnisse der einzelnen Wiederholversuche sind in Bild 6 in Beige mit der kleinsten Markergröße dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Maximalkraft mit wachsendem Linsendurchmesser linear ansteigt. Für den kleinsten Linsendurchmesser sind alle fünf Wiederholversuche an der Schweißlinsengrenze auf Seite des HCT780XD Blechs entlang abgeschält. Bei makroskopischer Betrachtung (Bild 7, rechts) ist das Bruchbild kaum von einem Fügeebenenbruch zu unterscheiden. Im Schliff (Bild 7, links) ist eindeutig zu erkennen, dass der Riss entlang der Linsenkontur verläuft. Das Gefüge weist eine typische Martensitstruktur auf, womit von einer Aufschmelzung und kompletten Verbindung der beiden Bleche ausgegangen werden kann. Somit ist eine Haftverbindung auszuschließen.



Bild 7
Bruch entlang der Schweißlinsengrenze in Versuchsreihe 1a-1 22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (1,0 mm) mit $d_L = 4,5 \text{ mm}$

In Versuchsreihe 1a-2 sind vier Wiederholversuche aus HCT780XD ausgeknöpft und ein Wiederholversuch ist aus beiden Blechen ausgeknöpft. Das doppelseitige Ausknöpfen ist in Reihe 1a-3 dreimal aufgetreten und zweimal ist der Schweißpunkt nur aus HCT780XD ausgeknöpft. Für die beidseitig ausgeknöpften Proben wird vermutet, dass der Riss in HCT780XD initiierte und ein zweiter Riss in 22MnB5 nachfolgend auftrat. Aufgrund des sehr dünnen HCT780XD Blechs in den Reihen 1a-1, 1a-2 und 1a-3 wird das Blech unter der Scherzugbelastung sehr stark deformiert, während das 22MnB5 Blech wenig verformt. Dadurch werden die Normalkräfte auf das 22MnB5 Blech reduziert. Das Bruchverhalten wird wie in Bild 8 schematisch dargestellt vermutet. Zuerst kommt es zu einem Riss auf der Zugseite des HCT780XD Blechs ①. Dieser Riss verläuft zuerst in Blechdickenrichtung und anschließend entlang des Radius im HCT780XD Blech. Bevor der Schweißpunkt komplett aus HCT780XD ausknöpft, beginnt im Folgenden auf der Zugseite des 22MnB5 ein Riss ②, der ebenfalls zuerst in Blechdickenrichtung und anschließend in Umfangsrichtung weiterläuft.

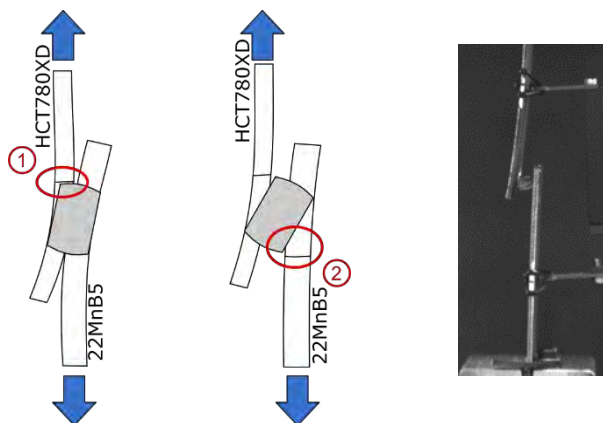


Bild 8
Rekonstruktion des Bruchverhaltens an Probe 1a-3-Sz-1, Aramis-Aufnahme kurz vor Beendigung des Versuchs und Schemaskizzen zur Darstellung des Rissverlaufs

Die Versuchsreihen 1a-10 ($d_L = 4,8 \text{ mm}$) und 1a-11 ($d_L = 6,0 \text{ mm}$) wurden mit HCT780XD in 1,3 mm Blechdicke geschweißt und sind in Bild 6 mit orangenen Markern dargestellt. Die Verbindung mit dem kleineren Linsendurchmesser erreicht eine fast identische Maximalkraft wie Verbindung 1a-3, für die ein gleicher Linsendurchmesser jedoch mit einem etwas dünneren Blech (1,0 mm) geschweißt wurde. In dieser Versuchsreihe tritt dreimal ein Fügeebenenbruch und zweimal Ausknöpfbruch aus beiden Blechen auf. In Versuchsreihe 1a-11 sind vier Proben aus beiden Blechen ausgeknöpft und eine Probe nur aus HCT780XD. Aus dem größeren Linsendurchmesser gegenüber Versuchsreihe 1a-10 resultiert für die Versuchsreihe 1a-11 eine höhere Maximalkraft. Für die Blechdickenkombination 22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (1,5 mm) wurden insgesamt fünf Versuchsreihen geprüft. Nach aufsteigendem Linsendurchmesser sortiert sind dies 1a-4 ($d_L = 4,7 \text{ mm}$), 1a-14 ($d_L = 5,5 \text{ mm}$), 1a-6 ($d_L = 5,7 \text{ mm}$), 1a-15 ($d_L = 6,4 \text{ mm}$) und 1a-5 ($d_L = 6,9 \text{ mm}$). In Versuchsreihe 1a-4 sind drei unterschiedliche Bruchbilder aufgetreten. Die dazugehörigen Kraft-Wegkurven sind in Bild 10 dargestellt. Zwei Wiederholungen haben über Ausknöpfen aus dem oberen Blech 22MnB5

versagt (ALL1a-4-Sz-1 und ALL1a-4-Sz-5), zwei weitere Wiederholungen über Fügeebenenbrüche (ALL1a-4-Sz-2 und ALL1a-4-Sz-4) und eine Probe weist einen Linsengrenzbruch mit Scheranteil auf (ALL1a-4-Sz-3).



Bild 9
Schliff der gebrochenen Probe 1a-4-Sz-3 der Verbindung 22MnB5 ($t = 1,5$ mm) und HCT780XD ($t = 1,5$ mm) mit $d_L = 4,7$ mm

Der Schliff der gebrochenen Probe 1a-4-Sz-3 ist in Bild 9 abgebildet. Der Riss lief entlang der Schweißlinsengrenze in 22MnB5 bis zur Blechoberfläche. Weiterhin ist ein Abscheren in der Fugeebene zu erkennen. Es wird vermutet, dass der Riss entlang der Schweißlinsengrenze zuerst eintritt und anschließend der Fügepunkt abschert. Anzu merken ist, dass der Kraft-Wegverlauf der Probe 1a-4-Sz-3 den Proben, die unter Ausknöpfen versagt haben ähnlicher ist, als den Verläufen der Proben, die unter Abscheren versagt haben. Der Mittelwert der Versagenskraft für die beiden Proben, die in der Fugeebene abgeschert sind liegt bei $15,8$ kN, für die anderen drei Proben liegt die mittlere Versagenskraft bei $14,3$ kN.

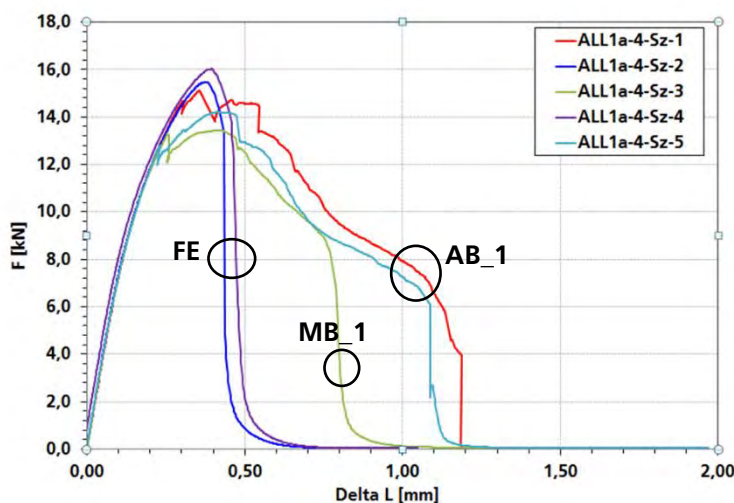


Bild 10
Kraft-Wegkurve der Versuchsreihe 1a-4 mit 22MnB5 ($t = 1,5$ mm) und HCT780XD ($t = 1,5$ mm) mit $d_L = 4,7$ mm

In Versuchsreihe 1a-14 wurden sechs Proben geprüft, die ausnahmslos über Ausknöpfen aus 22MnB5 versagt haben. Für den nächstgrößeren Linsendurchmesser sind ebenfalls alle fünf Proben aus 22MnB5 ausgeknöpft. In dieser Versuchsreihe wurde eine durchschnittliche Versagenskraft von $15,4$ kN gemessen. In Versuchsreihe 1a-6 tritt eine sehr hohe Streuung auf. Die Proben 1a-6-2, 1a-6-3, 1a-6-4 und 1a-6-5 haben eine durchschnittliche Versagenskraft von $16,3$ kN \pm $0,4$ kN. Probe 1a-6-1 weist jedoch mit $21,0$ kN eine deutlich höhere Versagenskraft auf. Eine solch auffällige Streuung ist auch in den Reihen 1b-2, 1b-3 und 1b-5 aufgetreten und wird in Abschnitt 3.7 näher untersucht.

Der zweitgrößte Linsendurchmesser, der für die Kombination 22MnB5 (1,5 mm) - HCT780XD (1,5 mm) geschweißt wurde ist $6,4$ mm in Versuchsreihe 1a-15. Wie in

Bild 6 zu erkennen, zeigen einzelne Proben niedrigere Versuchskräfte als einzelne Versuchsproben aus Reihen 1a-14 (5,5 mm) und 1a-6 (5,7 mm). Der Mittelwert der Maximalkraft ist jedoch größer (17,5 kN). Wie in den Reihen der zwei nächstkleineren Linsendurchmesser sind in Versuchsreihe 1a-15 alle sechs Wiederholversuche aus 22MnB5 ausgeknöpft.

Für den größten Linsendurchmesser (6,9 mm) wurde eine mittlere Versagenskraft von 21,4 kN erreicht. Drei Proben sind aus 22MnB5 ausgeknöpft, zwei Proben sind beidseitig ausgeknöpft.

In Versuchsreihen 1a-12 und 1a-13 wurde die Kombination 22MnB5 (1,5 mm) - HCT780XD (1,8 mm) verschweißt. Die Versuche sind mit dunkelroten Markern in Bild 6 gekennzeichnet. Der Linsendurchmesser für Reihe 1a-12 ist $d_L = 5,9 \text{ mm}$ und beträgt damit in Abhängigkeit von der kleineren Blechdicke ausgedrückt $4,8 \cdot \sqrt{t_{min}}$. Es sind zwei Fügeebenenbrüche und drei Ausknöpfrübrüche aus 22MnB5 aufgetreten. Wie in Reihe 1a-4 zeigten die Proben, die in der Fügeebene versagt haben eine etwas höhere Versagenskraft als die ausgeknöpften Wiederholversuche. In Reihe 1a-13 mit einem Linsendurchmesser $d_L = 6,6 \text{ mm}$ sind alle fünf Wiederholversuche aus 22MnB5 ausgeknöpft.



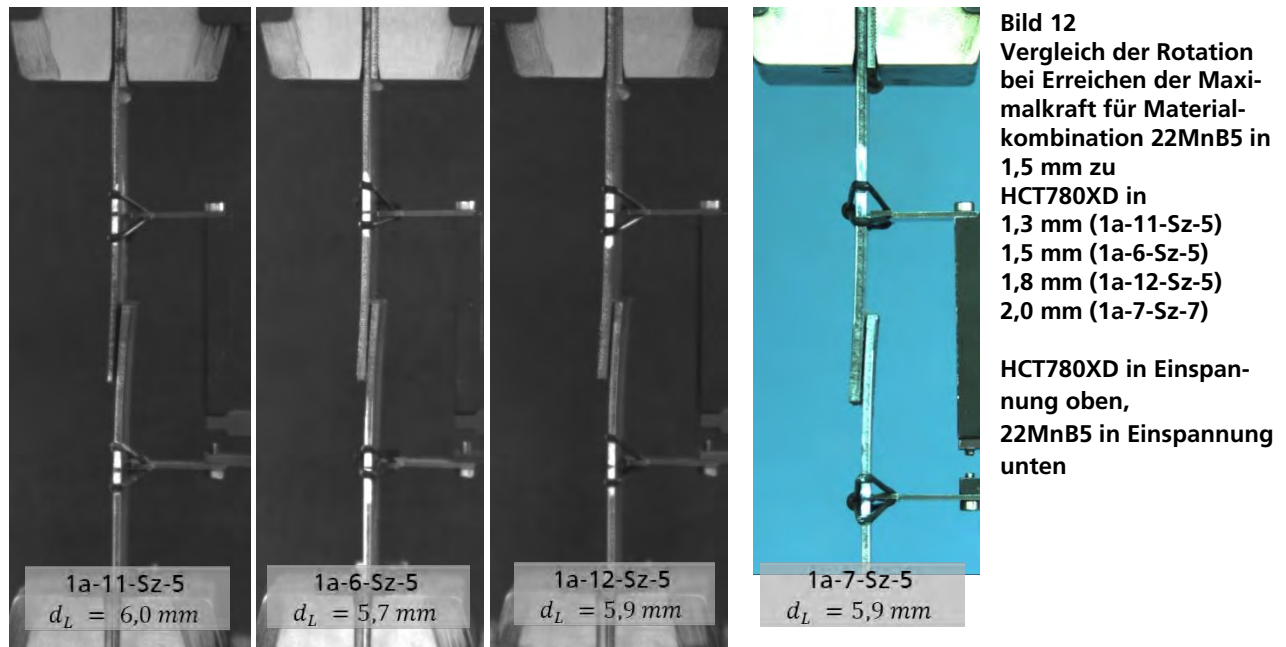
Bild 11
Schliff der gebrochenen Probe 1a-8-Sz-2 der Verbindung mit 22MnB5 (1,5 mm) und HCT780XD (2,0 mm) mit $d_L = 7,1 \text{ mm}$

Für die Kombination 22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (2,0mm) wurden drei Linsendurchmesser geschweißt, $d_L = 5,8 \text{ mm}$ in Reihe 1a-7, $d_L = 6,4 \text{ mm}$ in Reihe 1a-9 und $d_L = 7,1 \text{ mm}$ in Reihe 1a-8. Für den kleinsten Linsendurchmesser dieser Kombination sind vier Proben in der Fügeebene abgeschert und eine Probe ist aus 22MnB5 ausgeknöpft. Für den nächstgrößeren Linsendurchmesser von 6,4 mm sind alle fünf Proben abgeschert. Für Reihe 1a-7 beträgt der Linsendurchmesser in Abhängigkeit der kleineren Blechdicke ausgedrückt $4,7 \cdot \sqrt{t_{min}}$ für Reihe 1a-9 beträgt der Wert $5,2 \cdot \sqrt{t_{min}}$. Zwischen diesen beiden Reihen steigt die Maximalkraft über den Linsendurchmesser mit einer Steigung von 4,7 kN/mm. Durch die Gesamtdicke der Verbindung von 3,5 mm wird die Rotation der Verbindung verhindert. Dies begünstigt das Auftreten von Fügeebenenbrüchen.

In der Versuchsreihe 1a-8 kam es bei vier Proben zu Ausknöpfrübrüchen aus der Erweichungszone auf der Zugseite des 22MnB5 Blechs (Bild 11). Nur drei Versuche in Reihe 1a-8 wurden bis zum vollständigen Ausknöpfen getestet. Daher konnte nur bei drei Versuchen der Punktdurchmesser bestimmt werden (Bild 6, rechts). In dieser Versuchsreihe hat das Blech aus HCT780XD eine Blechdicke von 2 mm und der Linsendurchmesser beträgt 7,1 mm. Damit handelt es sich um die Versuchsreihe mit dem dicksten Blech und dem größten Linsendurchmesser. Hier führt die Rotationsbehinderung in Verbindung mit dem großen Linsendurchmesser zu einer Zugbelastung in der Erweichungszone.

Zwischen Versuchsreihe 1a-7 und 1a-9 steigt die mittlere Maximalkraft wie bereits erläutert über den Linsendurchmesser mit 4,7 kN/mm. Zwischen Versuchsreihe 1a-9 und 1a-8 steigt die mittlere Maximalkraft über den Linsendurchmesser mit 7,2 kN/mm. Der Anstieg ist deutlich größer und der Zusammenhang zwischen Linsendurchmesser und

Kraft kann für diese Blechdicken-/Materialkombination bei sehr großen Linsendurchmessern nicht als linear betrachtet werden. Aufgrund der Lokalisierung in der Erweichungszone wird die Schweißlinse entlastet. Die Erweichungszone kann aufgrund des duktilen Gefüges deutlich mehr Energie aufnehmen als das martensitische, spröde Schweißgut. Damit erreicht diese Verbindung eine deutlich höhere Versagenskraft als wenn die Energie in der Fügeebene aufgenommen worden wäre.



Eine entscheidende Rolle, wie sich die Belastung an der Fügespaltwurzel entwickelt, spielt die Deformation an der Fügestelle. Je dicker das Blech desto steifer verhält sich der Versuch bei Belastung und umso größer ist der Scheranteil der Belastung an der Fügestelle. In Bild 12 sind Aufnahmen von vier Blechdickenkombinationen zum Zeitpunkt der maximalen gemessenen Kraft dargestellt. Die Proben haben ähnliche Linsendurchmesser, unterscheiden sich aber in der Blechdicke des zweiten Fügepartners. Die hier einzeln aufgezeigten Proben hatten von links nach rechts die Maximalkräfte 15,7 kN, 16,7 kN, 20,2 kN und 19,7 kN. Es wurden Proben ausgewählt, die das innerhalb der Versuchsreihe dominanteste Bruchbild aufweisen. Von links nach rechts sind dies, AB_2,1 (Ausknöpfen aus HCT780XD und 22MnB5), AB_1 (Ausknöpfen aus 22MnB5), AB_1 (Ausknöpfen aus 22MnB5) und FE (Fügeebenenbruch). Für die Verbindung mit dem dünnsten Blech ist die Rotation der Verbindung am größten, wobei insbesondere das Blech aus HCT780XD deformiert wird. Der auftretende Bruchmechanismus wurde bereits anhand von Bild 8 erläutert. Die zunehmende Rotationsbehinderung führt zu einer stärkeren Belastung in der Fügeebene. Daher kommt es zu einem Fügeebenenbruch für Verbindung 1a-7-Sz-5. Die Maximalkraft ist verringert gegenüber der nächstkleineren Blechdicke.

3.2.2 Versuchsreihe 1b

Die experimentellen Ergebnisse für die Scherzugproben der Versuchsreihen 1b sind in Bild 13 grafisch dargestellt. Alle Kombinationen haben als ersten Fügepartner 22MnB5 (1,5 mm). Der zweite Fügepartner ist HCT980XD (1,5 mm) bzw. HCT600XD (1,5 mm). Zusätzlich sind die Versuchsreihen 1a dargestellt mit HCT780XD (1,5 mm). Insbesondere für die Versuchsreihen mit Linsendurchmessern größer 6,5 mm ist zu erkennen, dass Verbindungen mit HCT980XD deutlich höhere Versagenskräfte erreichen als Verbindungen mit ähnlichem Linsendurchmesser der Versuchsreihen mit HCT780XD und

HCT600XD. Zwischen den Versagenskräften der Verbindungen mit HCT600XD und HCT780XD ist nur wenig Unterschied zu erkennen.

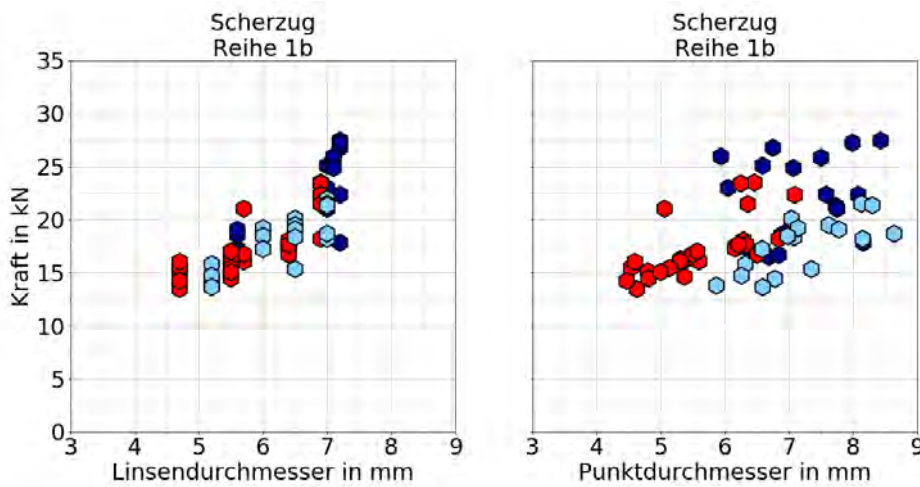


Bild 13
Exp. Ergebnisse der Scherzugproben mit 22MnB5 ($t = 1,5 \text{ mm}$) und HCT600XD, HCT780XD, HCT980XD in 1,5 mm Blechdicke

- HCT980XD
- HCT780XD
- HCT600XD

Der Werkstoff HCT600XD wurden in den Verbindungen 1b-1 ($d_L = 5,2 \text{ mm}$), 1b-7 ($d_L = 6,0 \text{ mm}$), 1b-3 ($d_L = 6,5 \text{ mm}$) und 1b-2 ($d_L = 7,0 \text{ mm}$) verschweißt. Alle Versuche aus diesen vier Versuchsreihen sind aus 22MnB5 ausgeknöpft. Einzige Ausnahme ist eine einzelne Probe aus Reihe 1b-2, die nicht bis zum vollständigen Ausknöpfen belastet wurde. Der Rissbeginn deutet jedoch darauf hin, dass bei weiterer Belastung auch hier ein Ausknöpfen aus 22MnB5 zu erwarten gewesen wäre.

In den Reihen 1b-2 und 1b-3 sind große Streuungen aufgetreten. Der niedrigste gemessene Wert der Versagenskraft in Reihe 1b-2 lag bei 18,2 kN, der höchste Wert lag bei 22,0 kN. Für Reihe 1b-3 lag der niedrigste Wert bei 15,3 kN und der höchste Wert bei 20,1 kN. In Abschnitt 3.7 werden diese Schwankungen näher untersucht.

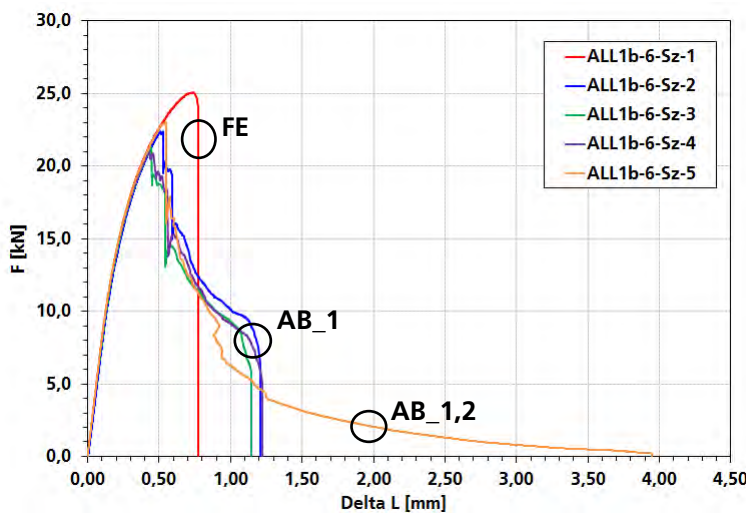


Bild 14
Kraft-Wegkurven der Versuchsreihe 1b-6 mit 22MnB5 ($t = 1,5 \text{ mm}$) und HCT980XD ($t = 1,5 \text{ mm}$) mit $d_L = 7,0 \text{ mm}$

Als nächstes werden alle Verbindungen mit HCT980XD betrachtet. Dies sind die Verbindungen der Versuchsreihen 1b-4 ($d_L = 5,6 \text{ mm}$), 1b-6 ($d_L = 7,0 \text{ mm}$), 1b-8 ($d_L = 7,1 \text{ mm}$) und 1b-5 ($d_L = 7,2 \text{ mm}$). In Reihe 1b-4 sind alle sechs Wiederholversuche aus 22MnB5 ausgeknöpft. In Reihe 1b-6 sind drei Proben aus 22MnB5 ausgeknöpft, eine Probe (1b-6-Sz-5) ist aus beiden Blechen ausgeknöpft und eine weitere Probe (1b-6-Sz-1) ist in der Fügeebene abgeschert. Die Kraft-Wegkurven der Versuchsreihe 1b-6 sind in Bild 14 dargestellt. Die höchste Kraft wurde für die abgescherte Probe erreicht. In der Versuchsreihe 1b-8 wurden drei Proben getestet, welche alle aus 22MnB5 ausge-

knöpft sind. Versuchsreihe 1b-5 hat den größten Linsendurchmesser, hier sind vier Proben aus 22MnB5 ausgeknöpft und eine Probe ist aus beiden Blechen ausgeknöpft. In dieser Reihe sind große Schwankungen aufgetreten. Die niedrigste Maximalkraft lag bei 17,8 kN, die höchste Maximalkraft bei 27,5 kN. Die Proben mit höchster und niedrigster Maximalkraft sind beide ausgeknöpft. Die Versuchsreihen 1b-6, 1b-8 und 1b-5 haben sehr ähnliche nominelle Linsendurchmesser. Die Maximalkräfte aus diesen Versuchsreihen liegen in einem Streuband zwischen 17,8 kN und 27,5 kN. Alle Kraft-Wegkurven aus diesen Reihen sind in Bild 15 dargestellt. In Versuchsreihe 1b-4 wurde die gleiche Material-/Blehdickenkombination getestet. In dieser Reihe war der Linsendurchmesser mit $d_L = 5,6 \text{ mm}$ deutlich kleiner als in den Reihen 1b-5, 1b-6 und 1b-8. Dennoch lag die mittlere Maximalkraft der Reihe 1b-4 bei 17,5 kN und erreichte damit annähernd die niedrigste gemessene Kraft der Reihe 1b-5.

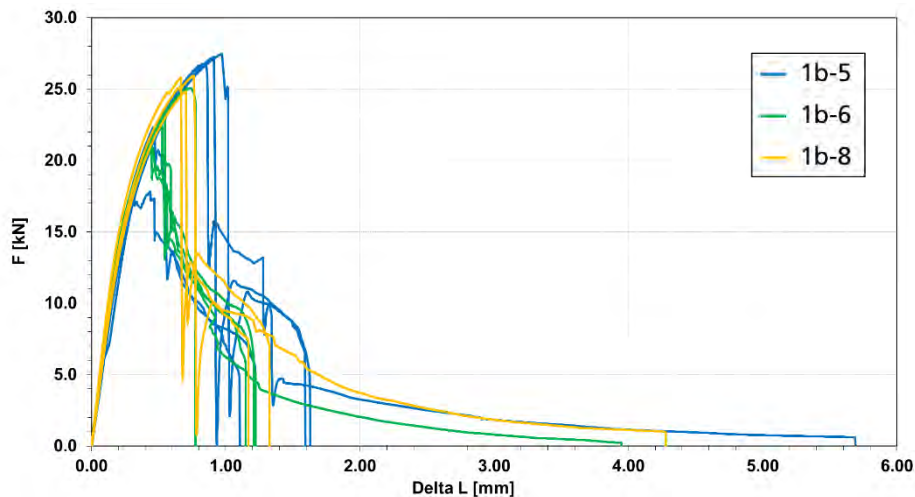


Bild 15
Kraft-Wegkurven mit 22MnB5 ($t = 1,5 \text{ mm}$) und HCT980XD ($t = 1,5 \text{ mm}$) der Versuchsreihen 1b-6 ($d_L = 7,0 \text{ mm}$), 1b-8 ($d_L = 7,1 \text{ mm}$) 1b-5 ($d_L = 7,2 \text{ mm}$)

3.2.3 Versuchsreihe 1c

Die experimentellen Ergebnisse für die Scherzugproben Versuchsreihe 1c sind in Bild 16 grafisch dargestellt. Alle Versuchsreihen haben die gleiche Material-/Blehdickenkombination HCT780XD (1,5 mm) – DC04 (1,0 mm). Die Linsendurchmesser betragen aufsteigend sortiert: 1c-1 ($d_L = 3,7 \text{ mm}$), 1c-4 ($d_L = 3,9 \text{ mm}$), 1c-3 ($d_L = 5,2 \text{ mm}$), 1c-5 ($d_L = 5,6 \text{ mm}$), 1c-2 ($d_L = 7,1 \text{ mm}$). In Bild 16 sind die gemessenen Maximalkräfte über den Linsendurchmesser (links) und Punktdurchmesser (rechts) dargestellt. Für die drei größeren Linsendurchmesser haben alle Proben mit Laschenbildung im DC04 Blech versagt.

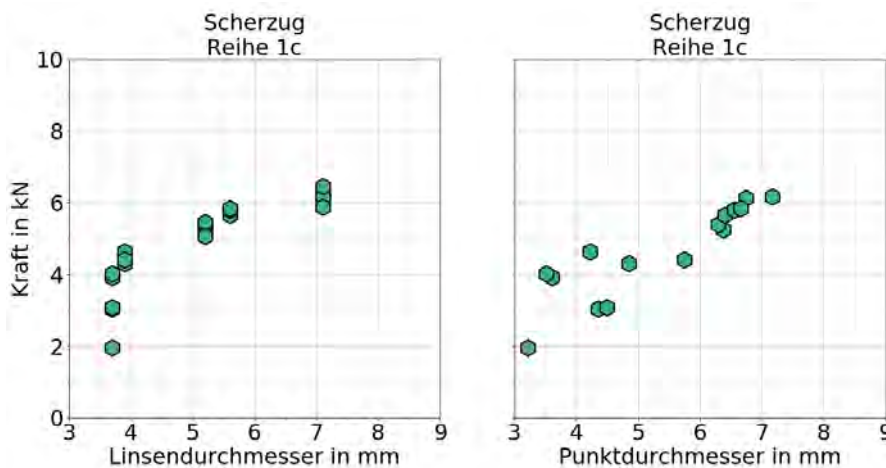


Bild 16
Exp. Ergebnisse der Scherzugproben mit HCT780XD ($t = 1,5 \text{ mm}$) und DC04 ($t = 1,0 \text{ mm}$)

Für den kleinsten Linsendurchmesser sind drei Fügeebenenbrüche und zwei Ausknöpfbrüche aus DC04 aufgetreten. Die beiden Proben mit der höchsten Maximalkraft (1c-1-Sz-1 und 1c-1-Sz-4) haben über Fügeebenenbrüche versagt (Bild 14). Sie haben die Punktdurchmesser 3,6 mm (1c-1-Sz-1) und 3,5 mm (1c-1-Sz-4). Die Proben 1c-1-Sz-2 und 1c-1-Sz-3 haben deutlich größere Punktdurchmesser (4,4 mm und 4,5 mm), jedoch niedrigere Maximalkräfte. Diese beiden Proben sind ausgeknöpft.

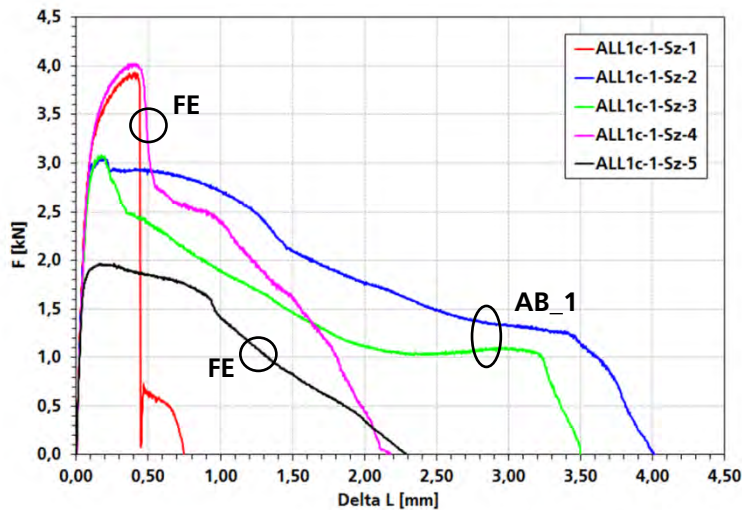


Bild 17
Kraft-Wegkurven der Versuchsreihe 1c-1 mit HCT780XD ($t = 1,5 \text{ mm}$) und DC04 ($t = 1,0 \text{ mm}$) mit $d_L = 3,7 \text{ mm}$

3.2.4 Zusammenfassung der Scherzugversuche

Für alle Material-/Blehdickenkombinationen wurde als kleinster Linsendurchmesser eine Größe von ca. $4 \cdot \sqrt{t_{\min}}$ geschweißt. In diesen Reihen kam es teilweise zu Fügeebenenbrüchen (1a-4 und 1a-12). Auffällig war, dass innerhalb einer Reihe, in der sowohl Fügeebenenbrüche als auch Ausknöpfbrüche auftraten, die abgeschnittenen Proben höhere Kräfte erreicht haben als die ausgeknöpften Proben. Dies ließ sich nicht durch Schwankungen des Linsendurchmessers innerhalb einer Reihe erklären. Dies deutet darauf hin, dass der Wechsel von Abscheren zu Ausknöpfen bei größer werdendem Linsendurchmesser zunächst mit einer Kraftabnahme verbunden ist bevor es bei deutlich größeren Linsendurchmessern und eindeutigem Auftreten von Ausknöpfbrüchen zu größeren Maximalkräften kommt. Dieses Phänomen konnte in den Reihen 1a-4, 1a-12, 1b-6 und 1c-1 beobachtet werden.

Der signifikante Einfluss des Linsendurchmessers auf die Tragfähigkeit ist vor allem in der Materialkombination 22MnB5 (1,5 mm) – HCT980XD (1,5 mm) zu erkennen. Hier wechselt der Bruchmechanismus von AB_1 (Ausknöpfen aus HCT980XD) über AB_1/FE zu AB_2 mit steigendem Linsendurchmesser. Die Materialkombination mit dem deutlich duktileren HCT600XD (1,5 mm) zeigte über alle Linsendurchmesser ein Ausknöpfen aus 22MnB5.

Für größere Gesamtblechdicken traten vermehrt Fügeebenenbrüche auf. Bei diesen Verbindungen wird die Rotation durch die Gesamtdicke verhindert und ein Abscheren in der Fügeebene begünstigt. Hier kann es auch bei größeren Linsendurchmessern zu Fügeebenenbrüchen kommen (Versuchsreihe 1a-9). Die Kraft steigt gegenüber dem nächstkleineren Linsendurchmesser (Versuchsreihe 1a-7). Im Vergleich zu einer Verbindung mit ähnlichem Linsendurchmesser und dünnerem HCT780XD Blech (Versuchsreihe 1a-12) ist die Maximalkraft jedoch niedriger.

Für die Verbindung mit dem größten Linsendurchmesser und der größten Gesamtblechdicke kam es zu einer Zugbelastung in der Erweichungszone von 22MnB5. Dies ist die einzige Reihe, in der die Erweichungszone kritisch wurde. Es handelt sich hier jedoch um Laborproben. Auch in anderen Material-/Blehdickenkombinationen kann die

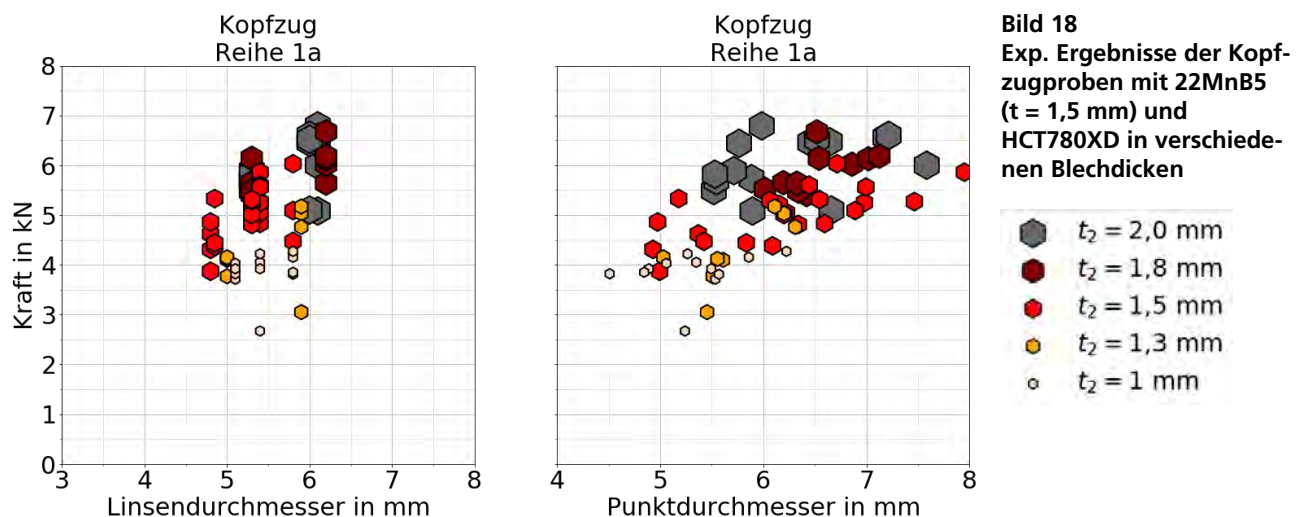
Erweichungszone kritisch werden, wenn es aufgrund der Belastungssituation zu einer Zugbelastung auf die Erweichungszone kommt.
Im anderen Extremfall, d.h. kleinster Linsendurchmesser bei kleinster Gesamtblechdicke (Versuchsreihe 1a-1) sind Linsengrenzbrüche aus HCT780XD aufgetreten. Dies konnte anhand von Schlifften bestätigt werden. In der Literatur werden Linsengrenzbrüche mit entkohlten Bereichen an der Linsengrenze in Verbindung gebracht [She17]. Diese Entkohlung tritt insbesondere bei Langzeitschweißungen auf. Da es sich hierbei um die kleinsten Linsendurchmesser und kürzeste Schweißzeit handelt, sind für die vorliegende Verbindung andere Ursachen zu vermuten.

Bei einigen Versuchsreihen kam es zu einem Ausknöpfen aus beiden Blechen, so dass teilweise der Schweißpunkt komplett aus der Verbindung herausgetrennt wurde. Es gab bei dieser Art des Versagensmechanismus keine eindeutige Steigerung oder Abminderung der Maximalkraft gegenüber Wiederholversuchen mit einseitigem Ausknöpfen aus derselben Versuchsreihe.

3.3 Experimentelle Ergebnisse der Kopfzugversuche

3.3.1 Versuchsreihe 1a

Die Werte aus den experimentellen Ergebnissen für die Kopfzugproben der Versuchsreihe 1a in Bild 18 grafisch dargestellt.



Links in Bild 18 ist die Maximalkraft über den nominellen Linsendurchmesser aufgetragen, rechts ist die Maximalkraft über den Punktdurchmesser aufgetragen. Die dargestellten nominellen Linsendurchmesser sind nicht bei jeder Reihe übereinstimmend mit den nominellen Linsendurchmessern der Scherzug- oder Schälzugproben. Die möglichen Ursachen hierfür sind vielfältig und umfassen z.B. Elektrodenabnutzung, Passgenauigkeit der Probenhälften, Geometrieinflüsse und Chargenunterschiede der Bleche.

Der Punktdurchmesser wurde anhand der Bruchfläche bestimmt. Unter Kopfzug kam es häufig zu Mischbrüchen. Hier wurden nicht der stehengebliebene Butzen gemessen, sondern die Bruchfläche inklusive Scherbruchfläche. Innerhalb einer Messreihe können Schwankungen von bis 1,7 kN auftreten (Reihe 1a-8).

Innerhalb der einzelnen Blechdickenkombinationen steigt die Maximalkraft mit wachsendem Linsendurchmesser linear an. Ebenso ist zu erkennen, dass die Maximalkraft mit zunehmender Blechdicke steigt. Nur zwischen Blechdicke 1,8 mm und 2,0 mm ist

kein deutlicher Unterschied in Maximalkraft bei gleichem Linsendurchmesser zu erkennen.

Für die Kombination 22MnB5 (1,5 mm) zu HCT780XD (1,0 mm) wurden drei unterschiedliche nominelle Schweißlinsendurchmesser geschweißt. Es handelt sich um die Versuchsreihen 1a-1 ($d_L = 5,1 \text{ mm}$), 1a-2 ($d_L = 5,8 \text{ mm}$) und 1a-3 ($d_L = 5,4 \text{ mm}$). Die experimentellen Ergebnisse dieser Versuchsreihen sind in Bild 18 in Beige mit der kleinsten Markergröße dargestellt. Bei der Darstellung der Maximalkraft gegenüber dem Punktdurchmesser können die einzelnen Versuchsreihen nicht unterschieden werden. Die maximalen Kräfte der drei Versuchsreihen liegen annähernd auf einer Gerade die mit zunehmendem Punktdurchmesser steigt. Alle Wiederholversuche der Reihe 1a-1 sind aus HCT780XD ausgeknöpft. In der Versuchsreihe 1a-3 sind zwei Proben aus HCT780XD ausgeknöpft, eine Probe ist aus 22MnB5 ausgeknöpft und die vierte Probe hat über Fügeebenenbruch versagt. Die drei ausgeknöpften Versuche zeigen ähnliche Versagenskräfte während Probe 3, welche in der Fügeebene abgesichert ist eine deutliche Minderung der Maximalkraft aufzeigt. Das Bruchbild zeigt, dass der Schweißpunkt nicht kreisrund ist (Bild 19). Die Bruchfläche hat die Form von zwei überlappenden Kreisen. Der Wiederholversuch kann als ungültig gewertet werden.

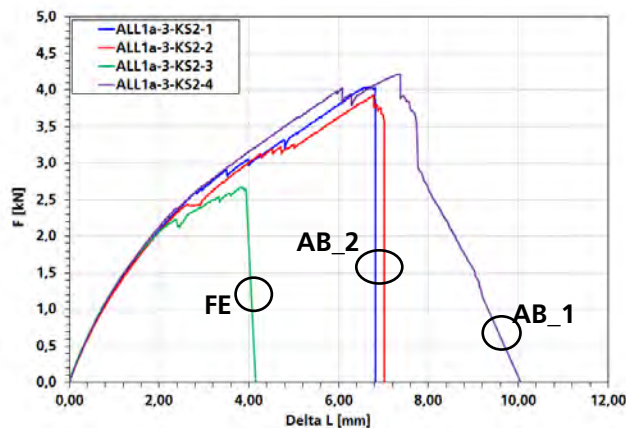


Bild 19
Kraft-Wegkurven der Versuchsreihe 1a-3 mit 22MnB5 ($t = 1,5 \text{ mm}$) und HCT780XD ($t = 1,0 \text{ mm}$) mit $d_L = 5,4 \text{ mm}$. Die obere Probenhälfte ist 22MnB5, die untere Probenhälfte HCT780XD.

Für den größten Linsendurchmesser dieser Kombination (1a-2) sind drei Proben aus HCT780XD ausgeknöpft und eine Probe aus 22MnB5.

Für die nächst größere Blechdicke von 1,3 mm für den Fügepartner HCT780XD wurden zwei Versuchsreihen geschweißt. Die Linsendurchmesser sind $d_L = 5,0 \text{ mm}$ für Versuchsreihe 1a-10 und $d_L = 5,9 \text{ mm}$ für Versuchsreihe 1a-11. Für den kleineren Linsendurchmesser haben alle Proben mit Mischbruch versagt, dabei haben zwei Proben anteilig aus dem oberen Fügepartner ausgeknöpft, zwei aus dem unteren Fügepartner. Der Mittelwert der vier Maximalkräfte in Versuchsreihe 1a-10 beträgt 4,0 kN. Für die Versuchsreihen 1a-11 weisen alle Wiederholversuche einen Mischbruch aus 22MnB5 auf. Eine Probe zeigt eine deutlich niedrigere Maximalkraft. Dies ist auch in Bild 18 zu erkennen. Hier ist Reihe 1a-11 mit orangenen Markern bei Linsendurchmesser 5,9 mm dargestellt. Es ist deutlich ein Ausreißer zu erkennen mit einer Maximalkraft von 3,1 kN. Die Bruchbilder (Bild 20) zeigen einen deutlich kleineren Ausknöpfanteil für die Probe mit der niedrigeren Maximalkraft (Probe 3).

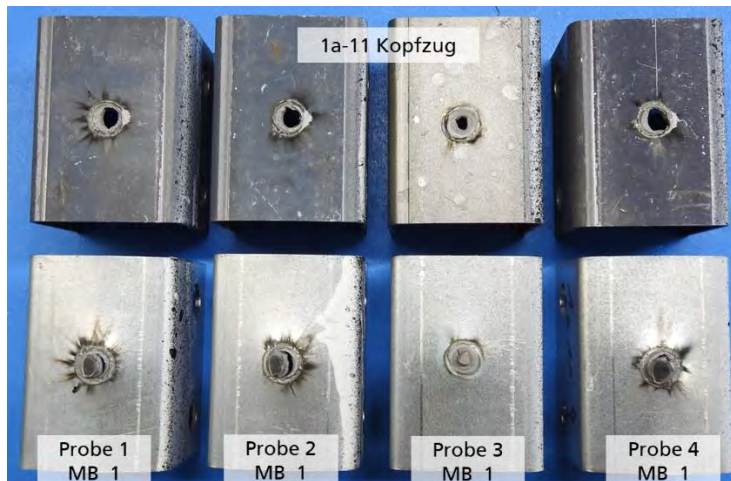


Bild 20
Probenbilder nach Versagen für die Reihe 1a-11
22MnB5 (1,5 mm) –
HCT780XD (1,3 mm) mit
 $d_L = 5,9 \text{ mm}$

Für die Material-/Blechkickenkombination 22MnB5 (1,5 mm) zu HCT780XD (1,5 mm) wurden insgesamt fünf Versuchsreihen angefertigt. Aufsteigend nach Linsendurchmesser sortiert handelt es sich um die Versuchsreihen 1a-4 ($d_L = 4,8 \text{ mm}$), 1a-14 ($d_L = 4,85 \text{ mm}$), 1a-6 ($d_L = 5,3 \text{ mm}$), 1a-5 ($d_L = 5,4 \text{ mm}$) und 1a-15 ($d_L = 5,8 \text{ mm}$). In allen Proben zusammengenommen sind 17 Proben mit Mischbruch aus 22MnB5 ausgeknöpft. Bei fünf Proben war der Scheranteil sehr klein, so dass diese als Ausknöpfbrüche aus 22MnB5 deklariert wurden. Die mittlere Maximalkraft steigt mit dem Linsendurchmesser von $4,4 \text{ kN}$ (1a-4), $4,7 \text{ kN}$ (1a-14), $5,1 \text{ kN}$ (1a-6) zu $5,3 \text{ kN}$ (1a-5). Nur die Versuchsreihe 1a-15 mit dem größten Linsendurchmesser zeigt eine Abweichung von diesem Trend und zeigt eine mittlere Maximalkraft von $5,2 \text{ kN}$. Für die Reihen 1a-14 und 1a-15 wurden nur drei Wiederholversuche durchgeführt. Des Weiteren war aufgrund des Mischbruchs das Ausmessen der Linsendurchmesser anhand der Schliffbilder mit großen Ungenauigkeiten behaftet. Beispielhaft ist ein Schliff zu Probe 1a-15-2 in Bild 21 dargestellt.

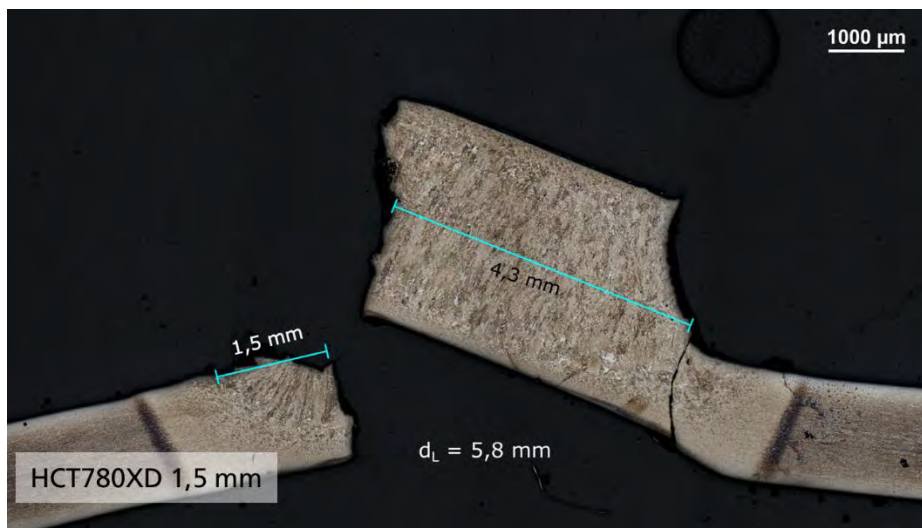


Bild 21
Schliff der gebrochenen
Probe 1a-15-KS2-90°-2
der Verbindung mit
22MnB5 (1,5 mm) und
HCT780XD (1,5 mm) mit
 $d_L = 5,8 \text{ mm}$

In Versuchsreihe 1a-5 wurden sieben Wiederholversuche durchgeführt. Drei Proben zeigten deutliche Spritzer. Die Spritzer waren der Belastungsrichtung zugewandt. Es ist keine deutliche Reduktion der Maximalkraft zu erkennen. Eine Probe (1a-5-KS2-90°-5) mit deutlichem Spritzer erreicht sogar die zweithöchste Maximalkraft der Reihe mit $5,6 \text{ kN}$. Die mittlere Maximalkraft der Reihe 1a-5 beträgt $5,3 \text{ kN}$.



Bild 22
Schliff der gebrochenen Probe 1a-5-KS2-90°-5 der Verbindung mit 22MnB5 (1,5 mm) und HCT780XD (1,5 mm) mit $d_L = 5,4 \text{ mm}$

In Bild 22 ist das Schliffbild dieser Probe dargestellt. Der Spritzer konnte in der Schliffprobe eingebettet werden und ist deutlich auf der rechten Seite zu erkennen. Auffällig ist, dass oberhalb des Spritzers ein deutlicher Anteil der Wärmeeinflusszone erhalten geblieben ist. Die blaue Verfärbung am Rand des Ausknöpfungsbereichs deutet auf die Grenze zwischen Wärmeeinflusszone und Erweichungszone hin. Bei Ausknöpfbrüchen oder Mischbrüchen in 22MnB5 unter Kopfzug läuft der Riss in der Regel entlang der Grenze zwischen WEZ und Schweißgut, bzw. entlang der Fugebene und anschließend durch das Schweißgut in Richtung Blechoberfläche bei Mischbruch. Da die Größe des stehengebliebenen Butzens häufig mit der Maximalkraft korreliert, könnte dies die Ursache für die im Vergleich zu den anderen Proben hohe Maximalkraft sein. Ob der Spritzer die Ursache für den Rissverlauf entlang der Grenze zwischen WEZ und EWZ ist, ist unklar.

Die Kombination 22MnB5 (1,5 mm) zu HCT780XD (1,8 mm) wurde mit den Linsendurchmessern $d_L = 5,3 \text{ mm}$ (1a-12) und $d_L = 6,2 \text{ mm}$ (1a-13) geschweißt. Die mittlere Maximalkraft beträgt 5,6 kN für 1a-12 und 6,1 kN für 1a-13. Die Streuung ist klein und alle Proben versagen mit Mischbruch aus 22MnB5 bis auf eine Probe aus Reihe 1a-12, die mit Mischbruch aus HCT780XD versagt.

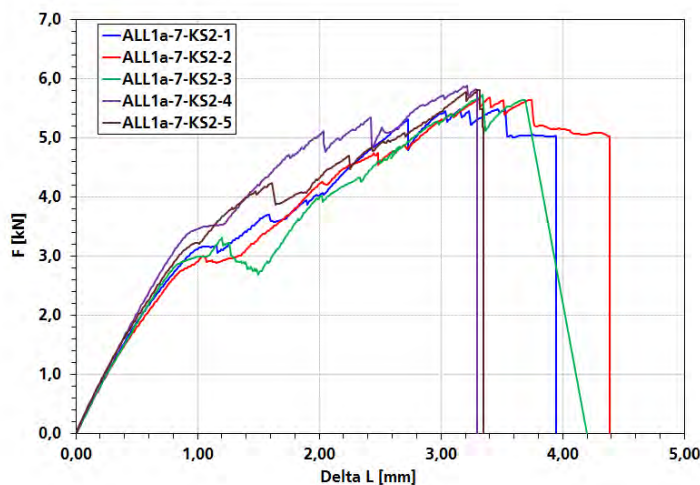


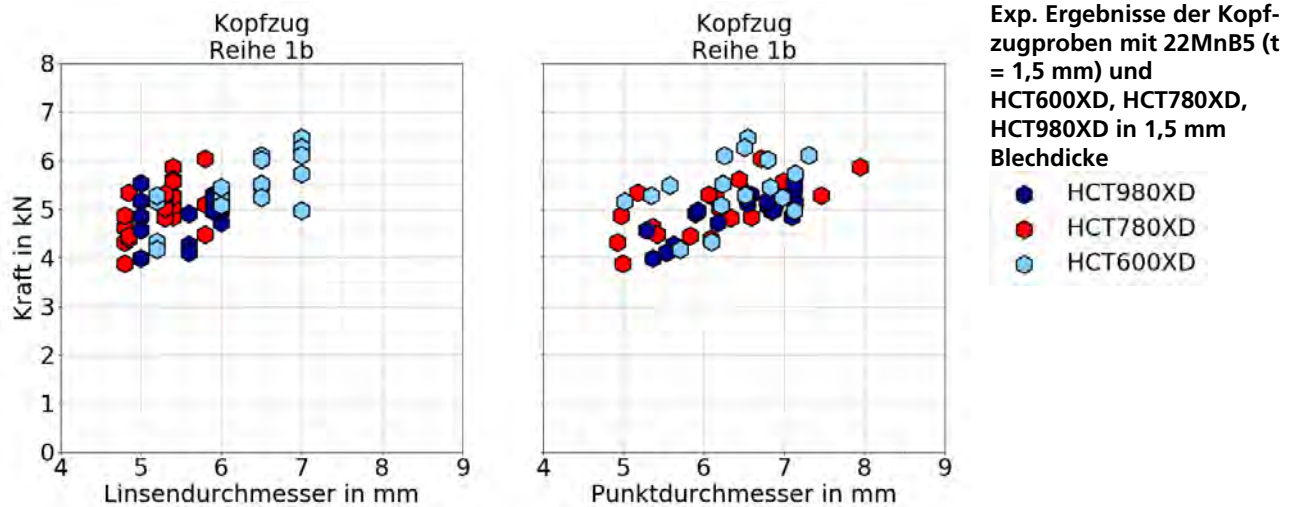
Bild 23
Kraft-Wegkurven der Versuchsreihe 1a-7 mit 22MnB5 ($t = 1,5 \text{ mm}$) und HCT780XD ($t = 2,0 \text{ mm}$) mit $d_L = 5,3 \text{ mm}$

Die Versuchsreihen mit dem dicksten HCT780XD Blech von 2,0 mm sind die Reihen 1a-7 ($d_L = 5,3 \text{ mm}$), 1a-9 ($d_L = 6,0 \text{ mm}$) und 1a-8 ($d_L = 6,1 \text{ mm}$). Die mittleren Maximalkräfte betragen 5,7 kN (1a-7), 6,2 kN (1a-9) und 6,2 kN (1a-8). Wie zu erwarten, unterscheiden sich die Kräfte zwischen 1a-9 und 1a-8 kaum, da auch die nominellen Linsendurchmesser nur 0,1 mm voneinander abweichen. Die Reihe mit dem kleinsten Linsendurchmesser (1a-7) hat, wie zu erwarten, die kleinste Maximalkraft. Drei Wiederholversuche aus Reihe 1a-7 sind in der Fugebene abgeschert, ein Wiederholversuch ist aus 22MnB5 ausgeknöpft und ein Wiederholversuch ist mit Mischbruch aus 22MnB5 ausgeknöpft. Die unterschiedlichen Versagensarten sind an den Kraft-Wegverläufen nicht

zu identifizieren (Bild 23). Deutlich zu erkennen ist hingegen, dass es bei allen Versuchen bereits bei ca. 3 kN zu ersten Anrissen kommt. Diese sind durch un stetige kleine Schwankungen in der Kraft zu erkennen. Dies ist charakteristisch für Mischbrüche bzw. einen sukzessiven Rissfortschritt entlang der Fügeebene. Alle Proben aus 1a-9 und 1a-8 haben entweder mit Mischbruch oder mit reinem Ausknöpfbruch in 22MnB5 versagt.

3.3.2 Versuchsreihe 1b

Die experimentellen Ergebnisse für die Kopfzugproben der Versuchsreihe 1b sind in Bild 24 grafisch dargestellt. In diesen Versuchsreihen wird 22MnB5 mit HCT600XD oder HCT980XD gepaart. Zusätzlich sind die Versuchsreihen aus 1a dargestellt, für die Materialkombination 22MnB5 zu HCT780XD. Alle Versuchsreihen haben für beide Fügepartner die Blechdicke 1,5 mm.



Die Versuche weisen starken Streuungen auf. Dies ist auf die dominierende Bruchart Mischbruch zurückzuführen. Die Maximalkräfte der Verbindungen mit HCT980XD befinden sich am unteren Rand des Streubands. Im Bereich $5,5 \text{ mm} \leq d_p \leq 6,5 \text{ mm}$ haben Proben mit HCT600XD die höchsten Kräfte. Proben mit HCT600XD sind jedoch sowohl am oberen Rand als auch am unteren Rand des Streubereichs zu finden.

Die Verbindungen mit HCT600XD sind, nach aufsteigendem Linsendurchmesser sortiert, die Versuchsreihen 1b-1 ($d_L = 5,2 \text{ mm}$), 1b-7 ($d_L = 6,0 \text{ mm}$), 1b-3 ($d_L = 6,5 \text{ mm}$) und 1b-2 ($d_L = 7,0 \text{ mm}$). Hier wurden die Maximalkräfte $4,7 \text{ kN}$ (1b-1), $5,3 \text{ kN}$ (1b-7), $5,7 \text{ kN}$ (1b-3) und $5,9 \text{ kN}$ (1b-2) gemessen. Die Maximalkräfte steigen somit monoton mit dem Linsendurchmesser an. In allen Versuchsreihen dieser Materialkombination sind fast ausschließlich Mischbrüche aus 22MnB5 aufgetreten. Zweimal wurden Ausknöpfbrüche aus 22MnB5 beobachtet. Hier war der Scheranteil sehr klein. Bei einem hohen Anteil der Proben waren weiterhin Risse in HCT600XD zu erkennen. Insbesondere in den Schliffbildern konnten Risse bestätigt werden. Diese Risse waren meistens einseitig halbkreisförmig der langen Probenseite zugewandt (siehe Bild 25). An dieser Position erfährt die Fügspaltwurzel die höchste Belastung.

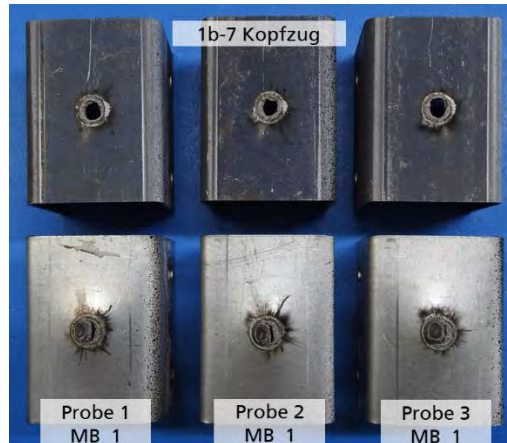


Bild 25
Probenbilder nach Versagen für die Reihe 1a-11
22MnB5 (1,5 mm) –
HCT600XD (1,5 mm) mit
 $d_L = 5,3 \text{ mm}$

Alle Kraft-Wegverläufe der Versuchsreihen mit HCT600XD sind in Bild 26 dargestellt. Die Darstellung verdeutlicht die hohen Streuungen, die aufgrund der Mischbruchcharakteristik auftreten.

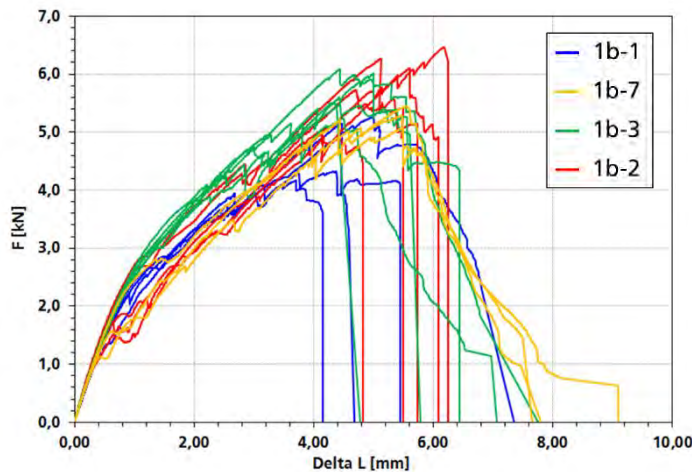


Bild 26
Kraft-Wegkurven mit
22MnB5 ($t = 1,5 \text{ mm}$) und
HCT600XD ($t = 1,5 \text{ mm}$)
der Versuchsreihen
1b-1 ($d_L = 5,2 \text{ mm}$)
1b-7 ($d_L = 6,0 \text{ mm}$)
1b-3 ($d_L = 6,5 \text{ mm}$)
1b-2 ($d_L = 7,0 \text{ mm}$)

Die Verbindungen mit HCT980XD sind nach aufsteigendem Linsendurchmesser sortiert die Versuchsreihen 1b-8 ($d_L = 5,0 \text{ mm}$), 1b-4 ($d_L = 5,6 \text{ mm}$), 1b-6 ($d_L = 5,9 \text{ mm}$) und 1b-5 ($d_L = 6,0 \text{ mm}$). Die mittleren Maximalkräfte sind $4,8 \text{ kN}$ (1b-8), $4,4 \text{ kN}$ (1b-4), $5,1 \text{ kN}$ (1b-6), $5,1 \text{ kN}$ (1b-5). In Versuchsreihe 1b-8 erreicht Probe 1 die höchste Maximalkraft mit $5,5 \text{ kN}$. Die niedrigste Maximalkraft wird von Probe 4 mit $4,0 \text{ kN}$ erreicht. Probe 4 weist einen deutlichen Spritzer auf (Bild 27). Der nominelle Linsendurchmesser wurde nur an einem Schliffbild für Probe 3 bestimmt. Daher ist dieser Wert nicht zwingend repräsentativ für alle Proben dieser Versuchsreihe. Die niedrigere Maximalkraft für Probe 4 kann also nicht eindeutig auf den Spritzer zurückgeführt werden. Probe 5 aus Versuchsreihe 1b-8 ist mit Mischbruch aus HCT980XD ausgeknöpft. Alle anderen vier Probenversuche aus 1b-8 sind mit Mischbruch aus 22MnB5 ausgeknöpft.

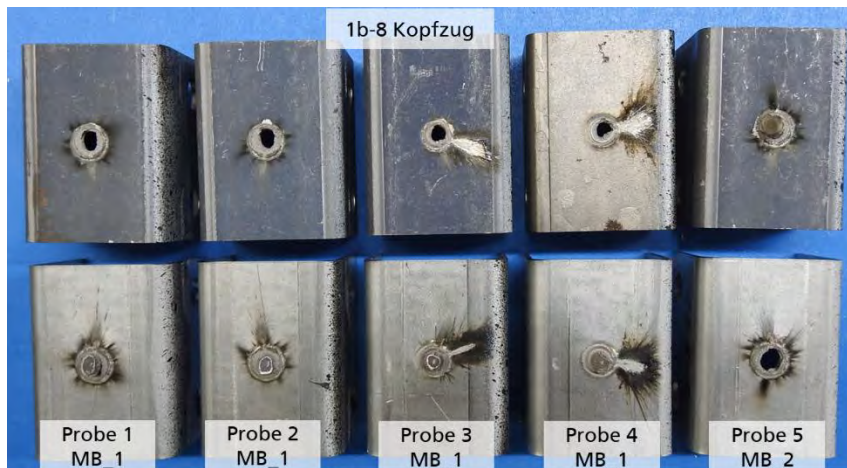


Bild 27
Probenbilder nach Versagen für die Reihe 1b-8
22MnB5 (1,5 mm) –
HCT980XD (1,5 mm) mit
mit $d_L = 5,0 \text{ mm}$

Alle drei Wiederholversuche der Versuchsreihe 1b-4 und alle vier Wiederholversuche der Reihe 1b-6 sind durch Mischbrüche aus 22MnB5 ausgeknöpft. Der größte Linsendurchmesser der Kombination 22MnB5 (1,5 mm) zu HCT980XD (1,5 mm) wurde in Versuchsreihe 1b-5 geschweißt. Hier wurden sechs Wiederholversuche durchgeführt. Die Kräfte bewegen sich in einem Streuband von $4,7 \text{ kN}$ bis $5,4 \text{ kN}$. Es traten zwei Ausknöpfbrüche aus 22MnB5 auf, zwei Mischbrüche aus 22MnB5, ein Ausknöpfbruch aus HCT980XD und ein Mischbruch aus HCT980XD. In allen Reihen unter Kopfbolzen treten auch mit 22MnB5 (1,5 mm) - HCT980XD (1,5 mm) starke Streuungen auf. Zur Verdeutlichung sind alle Versuchsreihen dieser Materialkombination in Bild 28 dargestellt.

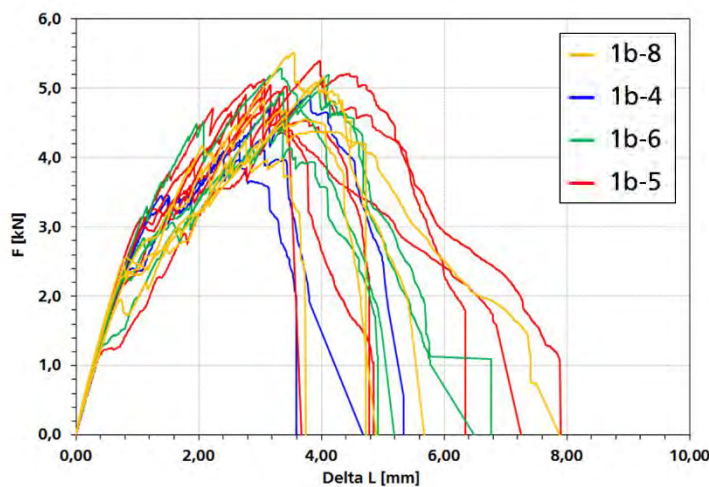


Bild 28
Kraft-Wegkurven mit
22MnB5 ($t = 1,5 \text{ mm}$) und
HCT980XD ($t = 1,5 \text{ mm}$)
der Versuchsreihen
1b-8 ($d_L = 5,0 \text{ mm}$)
1b-4 ($d_L = 5,6 \text{ mm}$)
1b-6 ($d_L = 5,9 \text{ mm}$)
1b-5 ($d_L = 6,0 \text{ mm}$)

3.3.3 Versuchsreihe 1c

Die experimentellen Ergebnisse für die Kopfbolzenproben der Versuchsreihe 1c sind in Bild 29 grafisch dargestellt. Es ist ein deutlicher linearer Zusammenhang zwischen Linsendurchmesser und Maximalkraft zu erkennen. Für den Linsendurchmesser $d_L = 6,2 \text{ mm}$ hatte ein Wiederholversuch eine deutlich niedrigere Maximalkraft. Diese Probe wies einen starken Spritzer auf.

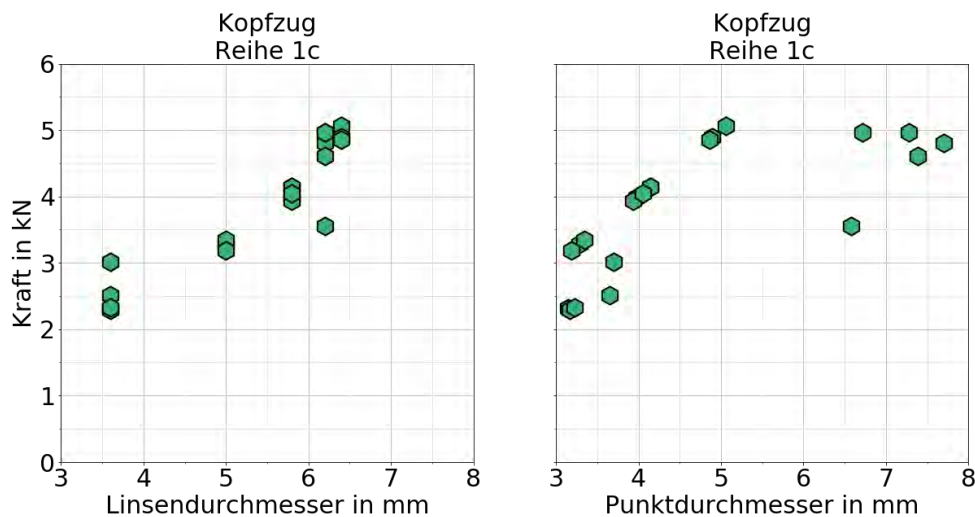


Bild 29
Exp. Ergebnisse der Kopfzugproben mit HCT780XD ($t = 1,5 \text{ mm}$) und DC04 ($t = 1,0 \text{ mm}$)

Die Kopfzugbelastung kann auch als beidseitige Schälzugbelastung angesehen werden. Bei dieser Materialkombination verformt sich der Fügepartner DC04 deutlich stärker wodurch die Schälbelastung an der Fügeseitwurzeln verstärkt wird. Für sehr große Punktdurchmesser (hier $d_p \geq 6 \text{ mm}$) verkleinert sich der Hebelarm, da der Schweißpunkt mehr Fläche in Probenbreitenrichtung einnimmt. Dies könnte ein Grund sein, warum die Kraft bei größeren Punkten nicht mehr monoton weiter ansteigt. Die Linsendurchmesser betragen aufsteigend sortiert: 1c-1 ($d_L = 3,6 \text{ mm}$), 1c-4 ($d_L = 5,0 \text{ mm}$), 1c-3 ($d_L = 5,8 \text{ mm}$), 1c-2 ($d_L = 6,2 \text{ mm}$) und 1c-5 ($d_L = 6,4 \text{ mm}$). Die mittlere Maximalkraft beträgt $2,3 \text{ kN}$ (1c-1), $3,3 \text{ kN}$ (1c-4), $4,1 \text{ kN}$ (1c-3), $4,6 \text{ kN}$ (1c-2) und $4,9 \text{ kN}$ (1c-5). Alle Proben sind ausnahmslos aus DC04 ausgeknöpft.

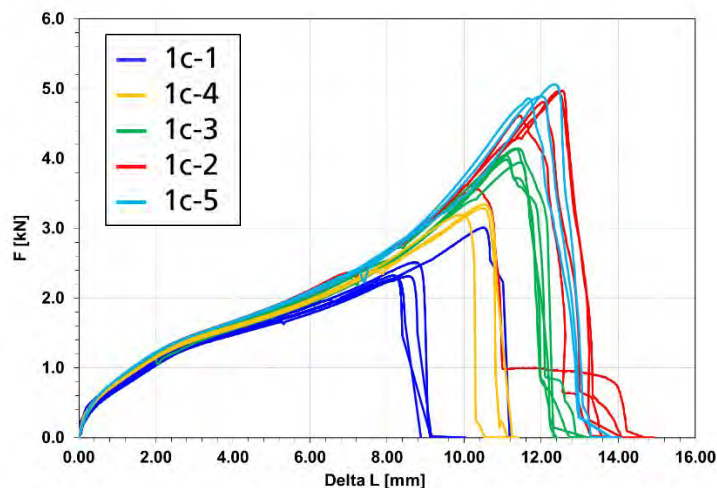


Bild 30
Kraft-Wegkurven mit 22MnB5 ($t = 1,5 \text{ mm}$) und DC04 ($t = 1,0 \text{ mm}$) der Versuchsreihen
1c-1 ($d_L = 3,6 \text{ mm}$)
1c-4 ($d_L = 5,0 \text{ mm}$)
1c-3 ($d_L = 5,8 \text{ mm}$)
1c-2 ($d_L = 6,2 \text{ mm}$)
1c-5 ($d_L = 6,4 \text{ mm}$)

Im Gegensatz zu den Proben aus den Reihen 1a und 1b bleibt die kreisrunde Form des Butzens nach dem Ausknöpfen in Reihe 1c weitgehend erhalten. Es wird kein Mischbruchanteil beobachtet. Dies ist auf das sehr duktile Verhalten von DC04 zurückzuführen. In Bild 30 ist zu erkennen, dass durch das saubere Ausknöpfen wenig Schwankungen innerhalb einer Versuchsreihe auftreten. Die Kurven verlaufen bis zum Kraftmaximum glatt und fallen dann steil ab.

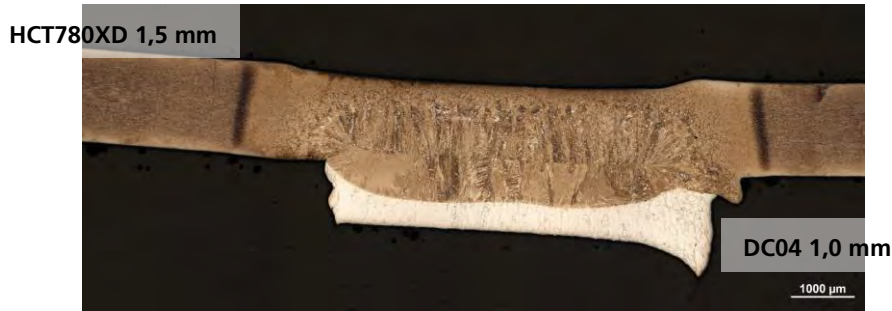


Bild 31
Schliff der gebrochenen
Probe 1c-3-KS2-90°-4 der
Verbindung mit
HCT780XD (1,5 mm) und
DC04 (1,0 mm) mit $d_L =$
5,8 mm

In den Schliffen der Verbindung 1c konnte die Schweißlinsemitte klar identifiziert werden. Sie liegt in der geometrischen Mitte, d.h. der halben Gesamthöhe der Verbindung. Bild 31 zeigt einen deutlichen Unterschied zwischen der Mikrostruktur des Schweißguts oberhalb und unterhalb der Schweißlinsemitte.

3.3.4 Zusammenfassung der Kopfzugversuche

Der Fügepartner 22MnB5 trägt in den Versuchsreihen 1a und 1b maßgeblich zum Bruchmodus bei. Für gleichartige Verbindungen mit Dualphasenstahl wird unter Kopfzug für Zugfestigkeiten bis 1000 MPa ein reines duktiles Versagen außerhalb der Wärmeeinflusszone im Grundwerkstoff beobachtet. Gleichartige Verbindungen aus 22MnB5 zeigen unter Kopfzug eine Mischbruchcharakteristik auf, wie sie auch hier beobachtet wird.

Aufgrund des Mischbruchverhaltens kam es zu starken Schwankungen in der Maximalkraft bei gleichen Parametern. Es konnte nur wenig Unterschied zwischen verschiedenen Werkstoffen (HCT600XD, HCT780XD, HCT980XD) für den zweiten Fügepartner beobachtet werden. Deutlich stärker wirkte sich die Variation der Blechdicke innerhalb Reihe 1a aus. So ist deutlich zu erkennen, dass ein dickeres Blech zu einer höheren Maximalkraft führt.

Eine weitere Beobachtung im Zusammenhang von Mischbrüchen in 1a und 1b war eine ovale Ausbildung des Butzens. Dies war nicht durchgängig der Fall, jedoch konnte bei vielen Probenbildern nach Bruch festgestellt werden, dass der Durchmesser des Radius längs der Probe größer war als quer (siehe Bild 32). Sehr deutlich waren weiterhin halbkreisförmige Risse entlang des Butzens zu erkennen. Ein vollständiges Ausknöpfen aus beiden Fügepartnern, wie es teilweise für Scherzugproben auftrat, kam unter Kopfzug nicht vor.

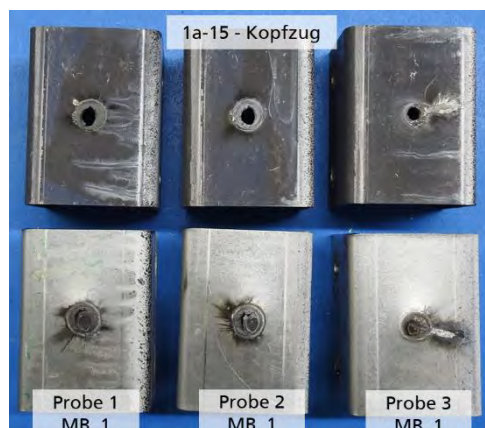


Bild 32
Probenbilder nach Versagen für die Reihe 1a-15
22MnB5 (1,5 mm) –
HCT780XD (1,5 mm) mit
 $d_L = 5,8$ mm

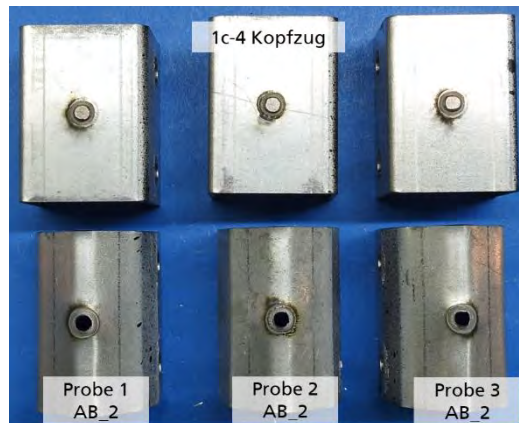


Bild 33
Probenbilder nach Versagen für die Reihe 1c-4
HCT780XD (1,5 mm) –
DC04 (1,0 mm) mit $d_L = 5,0 \text{ mm}$

Bild 33 zeigt repräsentativ die Bruchbilder einer Versuchsreihe aus 1c. Das DC04 Blech zeigt eine deutlich stärkere Verformung als das HCT780XD Blech. Es ist ein reines Ausknöpfen zu erkennen. Der Butzen behält seine kreisrunde Form bei. Alle Versuchsreihen zeigen unter Kopfzug einen Anstieg der Kräfte bei wachsendem Punktdurchmesser. Ab einem Punktdurchmesser von 6 mm tritt eine Sättigung auf. Diese Sättigung trat für die Versuchsreihen 1a umso eher auf, umso dicker das HCT780XD Blech war.

3.4 Experimentelle Ergebnisse der Schälzugversuche

3.4.1 Versuchsreihe 1a

Die experimentellen Ergebnisse für die Schälzugproben der Versuchsreihe 1a sind in grafisch dargestellt. Alle Verbindungen in Versuchsreihe 1a haben als ersten Fügepartner 22MnB5 in 1,5 mm und als zweiten Fügepartner HCT780XD mit unterschiedlichen Blechdicken.

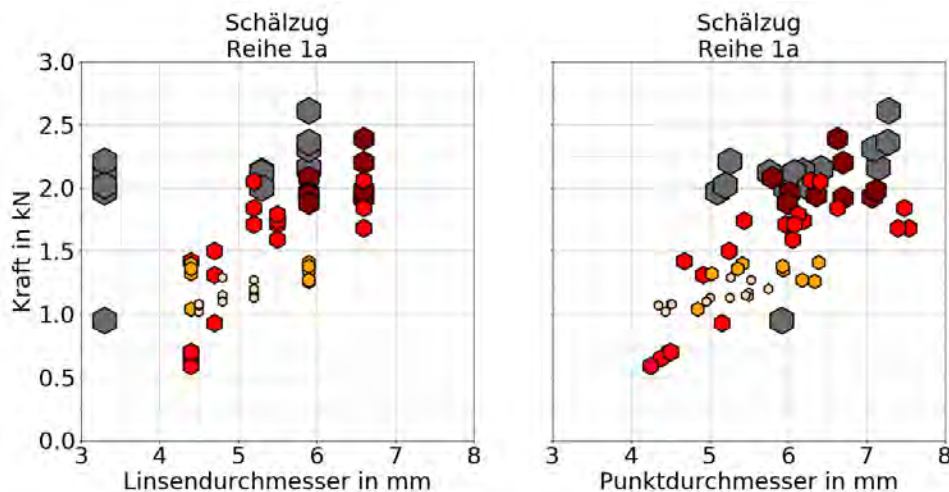


Bild 34
Exp. Ergebnisse der Schälzugproben mit
22MnB5 ($t = 1,5 \text{ mm}$) und
HCT780XD in verschiedenen
Blechdicken

- $t_2 = 2,0 \text{ mm}$
- $t_2 = 1,8 \text{ mm}$
- $t_2 = 1,5 \text{ mm}$
- $t_2 = 1,3 \text{ mm}$
- $t_2 = 1 \text{ mm}$

Die Versuchsreihen mit HCT780XD und 1 mm Blechdicke sind 1a-1 ($d_L = 4,5 \text{ mm}$), 1a-3 ($d_L = 4,8 \text{ mm}$) und 1a-2 ($d_L = 5,2 \text{ mm}$). Die mittleren Maximalkräfte der einzelnen Reihen sind $1,06 \text{ kN}$ (1a-1), $1,17 \text{ kN}$ (1a-3) und $1,18 \text{ kN}$ (1a-2). Der Anstieg der Maximalkraft mit steigendem Linsendurchmesser ist bei dieser Material-/Blechdickenkombination nur sehr klein. Alle Proben versagen durch Mischbruch aus HCT780XD. Für die Material-/Blechdickenkombination 22MnB5 (1,5 mm) zu HCT780XD (1,3 mm) wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt. Dies sind 1a-10 ($d_L = 4,4 \text{ mm}$) und 1a-11

($d_L = 5,9 \text{ mm}$). Die Reihe 1a-10 hat mit $1,28 \text{ kN}$ eine etwas kleinere mittlere Maximalkraft als die Reihe 1a-11, bei der eine mittlere Maximalkraft von $1,35 \text{ kN}$ erreicht wurde. Abgesehen von einem Wiederholversuch aus Reihe 1a-10, haben alle Reihen haben über Mischbruch aus HCT780XD versagt. Dieser Versuch hat eine deutlich niedrigere Maximalkraft als die anderen Wiederholversuche wie in Bild 34 zu erkennen ist. Obwohl sich ein Butzen gebildet hat, ist dieser nicht bis zur Blechoberfläche ausgeknöpft. Es ist ein deutlicher Riss durch das HCT780XD Blech zu erkennen, jedoch kein vollständiges Loch (Bild 35, rechts).

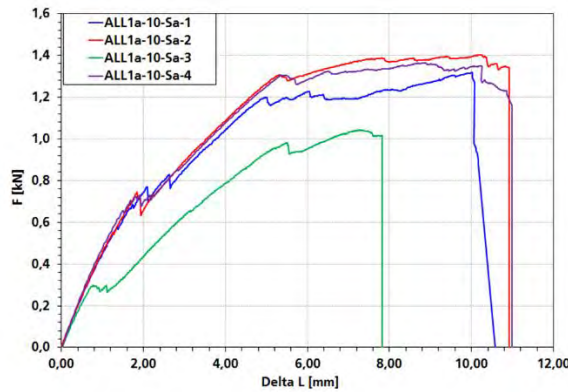


Bild 35
Kraft-Wegkurven der Versuchsreihe 1a-10 mit 22MnB5 ($t = 1,5 \text{ mm}$) und HCT780XD ($t = 1,3 \text{ mm}$) mit $d_L = 4,4 \text{ mm}$. Die obere Probenhälfte ist 22MnB5, die untere Probenhälfte HCT780XD.

Die Material-/Blehdickenkombination 22MnB5 ($1,5 \text{ mm}$) zu HCT780XD ($1,5 \text{ mm}$) wurde am häufigsten geprüft. Nach Linsendurchmesser aufsteigend sortiert, handelt es sich um die Versuchsreihen 1a-4 ($d_L = 4,4 \text{ mm}$), 1a-14 ($d_L = 4,7 \text{ mm}$), 1a-15 ($d_L = 5,2 \text{ mm}$), 1a-6 ($d_L = 5,5 \text{ mm}$) und 1a-5 ($d_L = 6,6 \text{ mm}$). Die mittleren Maximalkräfte der einzelnen Reihen sind $0,84 \text{ kN}$ (1a-4), $1,25 \text{ kN}$ (1a-14), $1,87 \text{ kN}$ (1a-15), $1,69 \text{ kN}$ (1a-6) und $1,81 \text{ kN}$ (1a-5). In Reihe 1a-4 lag die mittlere Maximalkraft deutlich niedriger als in Reihe 1a-1 mit Blechdicke 1 mm und $d_L = 4,5 \text{ mm}$ und auch deutlich niedriger als in Reihe 1a-10 mit Blechdicke $1,3 \text{ mm}$ und $d_L = 4,4 \text{ mm}$. In Bild 36 sind die Kraft-Wegkurven zu Reihe 1a-4 dargestellt. Die Proben 1, 3, 4 und 5 sind in der Fügeebene abgeschert und erreichen eine deutlich niedrigere Maximalkraft als Probe 2, welche mit Mischbruch aus 22MnB5 ausgeknöpft ist. Der Butzen hat einen Durchmesser von lediglich $1,9 \text{ mm}$. Grund für den Wechsel der Bruchart sind vermutlich kleine Unterschiede in der Mikrostruktur des Schweißguts. Dieses Phänomen mit sehr unterschiedlichen Maximalkräften und Wechsel von Fügeebenenbruch zu Mischbruch bei gleichen Parametern ist bei insgesamt vier Versuchsreihen aufgetreten. Es handelt sich um die Versuchsreihen 1a-4, 1a-7, 1a-14 und 1b-1. Es sind Reihen mit unterschiedlichen Blechdicken und auch unterschiedlichen Materialkombinationen betroffen. Der Linsendurchmesser ist jedoch für alle Reihen im unteren Schweißbereich. Für Reihe 1a-4 hat der Linsendurchmesser die Größe $d_L = 3,6 \sqrt{t_{\min}}$.

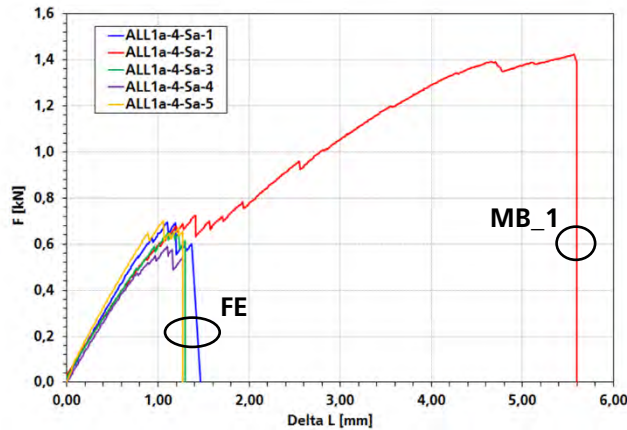


Bild 36
Kraft-Wegkurven der Versuchsreihe 1a-4 mit 22MnB5 ($t = 1,5 \text{ mm}$) und HCT780XD ($t = 1,5 \text{ mm}$) mit $d_L = 4,4 \text{ mm}$

Die Reihe 1a-14 hat die gleiche Blechdicken-/Materialkombination und weist das gleiche Phänomen auf (Bild 37). Hier haben zwei Proben über Mischbruch versagt und eine Probe ist in der Fügeebene abgescher. Der Linsendurchmesser beträgt $d_L = 3,8 \sqrt{t_{min}}$.

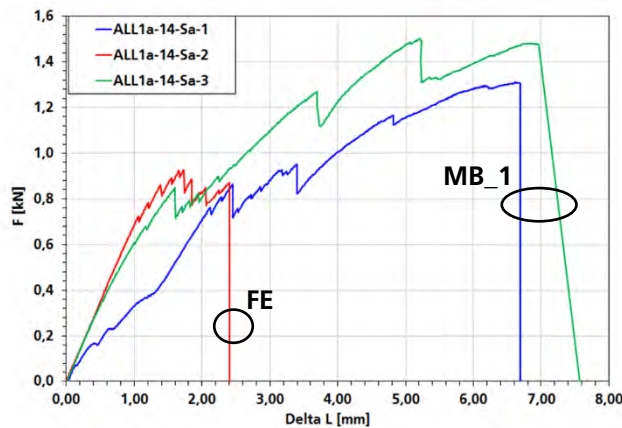


Bild 37
Kraft-Wegkurven der Versuchsreihe 1a-14 mit 22MnB5 ($t = 1,5 \text{ mm}$) und HCT780XD ($t = 1,5 \text{ mm}$) mit $d_L = 4,7 \text{ mm}$

In den Versuchsreihen 1a-15, 1a-6 und 1a-5 haben alle Versuchsreihen mit Mischbruch aus 22MnB5 versagt. Bild 38 zeigt beispielhaft eine Probe dieser Reihen. Es handelt sich um eine Probe aus Reihe 1a-6. Hier ist zu erkennen, dass sich der Butzen nicht konzentrisch ausbildet. An der belasteten Seite wird der Riss initiiert und läuft entlang der Fügeebene. Anschließend wechselt die Rissrichtung und der Riss läuft in Blechdickenrichtung weiter.



Bild 38
Bildaufnahme nach Bruch und Schliff der Probe 1a-6-Sa-2 der Verbindung mit 22MnB5 (1,5 mm) und HCT780XD (1,5 mm) mit $d_L = 5,5 \text{ mm}$

Der Fügepartner HCT780XD in Blechdicke 1,8 mm wurde in den Versuchsreihen 1a-12 ($d_L = 5,9 \text{ mm}$) und 1a-13 ($d_L = 6,6 \text{ mm}$) verschweißt. Die mittlere Maximalkraft beträgt 1,96 kN (1a-12) und 2,06 kN (1a-13). Alle Proben haben über Mischbruch aus 22MnB5 versagt.

In den Versuchsreihen 1a-7 ($d_L = 3,3 \text{ mm}$), 1a-9 ($d_L = 5,3 \text{ mm}$) und 1a-8 ($d_L = 5,9 \text{ mm}$) wurde das HCT780XD in der Stärke 2,0 mm verschweißt. Die mittleren Maximalkräfte sind 1,81 kN (1a-7), 2,06 kN (1a-9) und 2,31 kN (1a-8). Alle Proben haben in 22MnB5 mit Mischbruch versagt bis auf eine Probe der Reihe 1a-7. Diese Probe zeigt einen Fügeebenenbruch. Bei Betrachtung des Schlibbildes (Bild 39) ist zu erkennen, dass es sich nicht um einen reinen Fügeebenenbruch handelt. Der Bruch verläuft nicht glatt durch die Fügeebene und es ist weiterhin ein Riss durch das Blech zu erkennen.



Bild 39
Schlibb der gebrochenen Probe 1a-7-Sa-3 der Verbindung mit 22MnB5 (1,5 mm) und HCT780XD (2,0 mm) mit $d_L = 3,3 \text{ mm}$

Durch den Wechsel der Bruchart ist auch hier das Phänomen aufgetreten, dass deutlich unterschiedliche Maximalkräfte innerhalb einer Versuchsreihe bei gleichen Parametern erreicht wurden (Bild 40). Der Linsendurchmesser dieser Versuchsreihe beträgt nur $d_L = 2,7 \sqrt{t_{\min}}$.

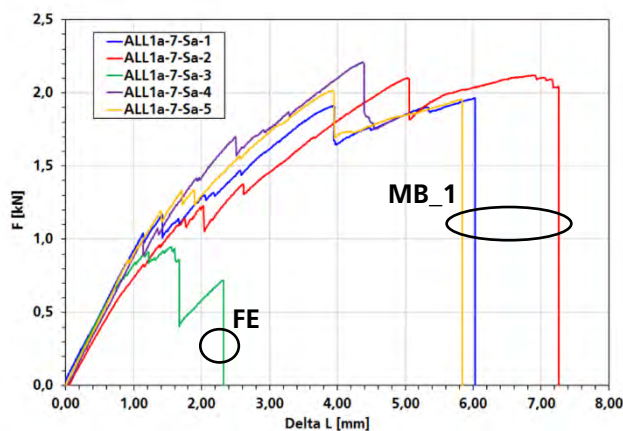


Bild 40
Kraft-Wegkurven der Versuchsreihe 1a-7 mit 22MnB5 ($t = 1,5 \text{ mm}$) und HCT780XD ($t = 2,0 \text{ mm}$) mit $d_L = 3,3 \text{ mm}$

3.4.2 Versuchsreihe 1b

Die experimentellen Ergebnisse für die Schälzugproben der Versuchsreihe 1b sind in Bild 41 grafisch dargestellt. Es handelt sich um die Materialkombinationen 22MnB5 zu HCT600XD und HCT980XD. Alle Bleche haben eine Blechdicke von 1,5 mm. Zusätzlich werden die Reihen aus 1a dargestellt mit HCT780XD in 1,5 mm.

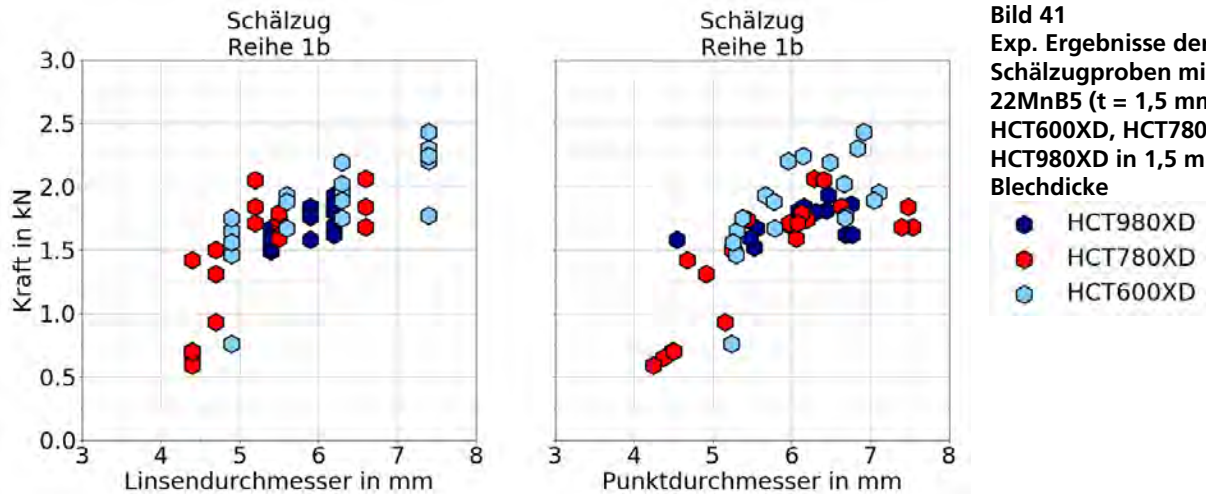


Bild 41
Exp. Ergebnisse der Schälzugproben mit 22MnB5 ($t = 1,5 \text{ mm}$) und HCT600XD, HCT780XD, HCT980XD in 1,5 mm Blechdicke

- HCT980XD
- HCT780XD
- HCT600XD

Es ist eine Tendenz zu erkennen, dass mit HCT600XD die höchsten Kräfte und mit HCT980XD die kleinsten Kräfte erreicht werden. Dies ist insbesondere für Verbindungen mit dem nominellen Linsendurchmesser im Bereich um 5,5 mm zu erkennen.

Die Versuchsreihen mit HCT600XD sind nach Linsendurchmesser aufsteigend sortiert 1b-1 ($d_L = 4,9 \text{ mm}$), 1b-7 ($d_L = 5,6 \text{ mm}$), 1b-3 ($d_L = 6,3 \text{ mm}$) und 1b-2 ($d_L = 7,4 \text{ mm}$). Die mittleren Maximalkräfte sind 1,44 kN (1b-1), 1,83 kN (1b-7), 1,96 kN (1b-3) und 2,19 kN (1b-2). Die Maximalkräfte steigen annähernd linear mit steigendem Linsendurchmesser an. Das in Versuchsreihe 1a bereits dreifach aufgetretene Phänomen des Bruchartenwechsels bei gleichen Parametern tritt hier bei Versuchsreihe 1b-1 auf. Der Linsendurchmesser ist $d_L = 4,0 \sqrt{t_{min}}$ groß. In Bild 42 sind die Kraft-Wegkurven dargestellt. Nur Probe 2 zeigt einen Fügeebenenbruch, alle anderen Proben sind mit Mischbruch versagt. Probe 1 versagte mit Mischbruch aus HCT600XD und Proben 3, 4 und 5 aus 22MnB5.

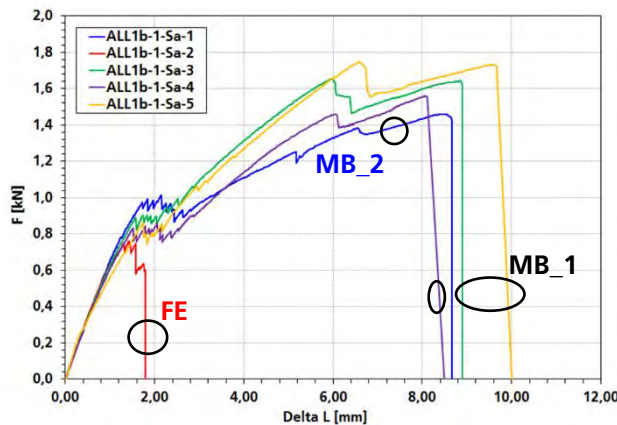


Bild 42
Kraft-Wegkurven der Versuchsreihe 1b-1 mit 22MnB5 ($t = 1,5 \text{ mm}$) und HCT600XD ($t = 1,5 \text{ mm}$) mit $d_L = 4,9 \text{ mm}$

In den Versuchsreihen 1b-7 und 1b-3 haben alle Proben mit Mischbruch aus 22MnB5 versagt. In Reihe 1b-2 haben zwei Proben mit Mischbruch aus 22MnB5 versagt. Eine Reihe hat mit Mischbruch aus HCT600XD versagt. Zwei Proben wurden nicht bis zum Bruch belastet, zeigten jedoch Ansätze von Laschenbildung aus HCT600XD.

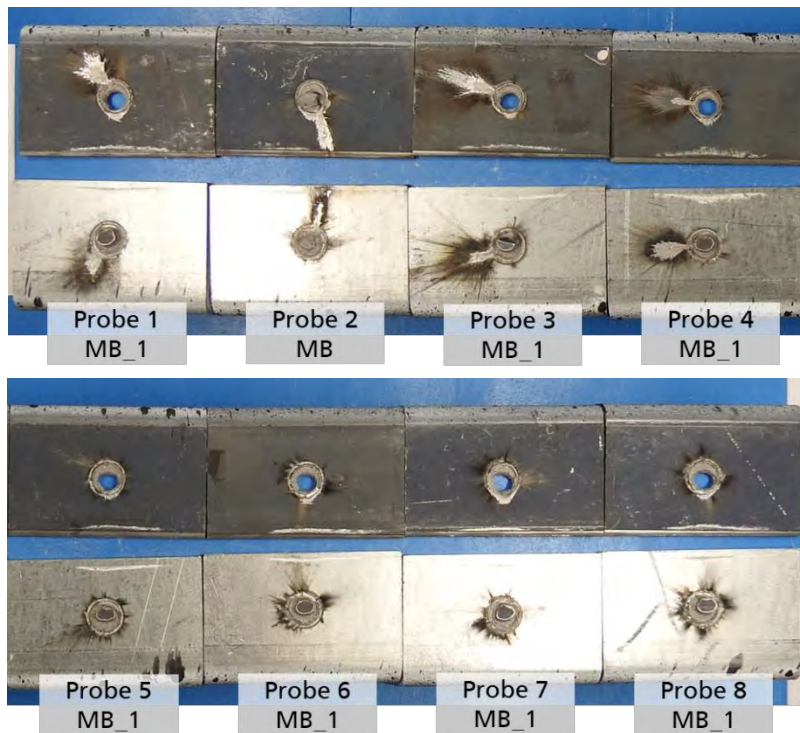


Bild 43
Probenbilder nach Versagen für die Reihe 1b-5
22MnB5 (1,5 mm) –
HCT980XD (1,5 mm) mit
 $d_L = 6,2 \text{ mm}$

Die Versuchsreihen mit HCT980XD sind nach aufsteigendem Linsendurchmesser sortiert die Versuchsreihen 1b-4 ($d_L = 5,4 \text{ mm}$), 1b-6 ($d_L = 5,9 \text{ mm}$) und 1b-5 ($d_L = 6,2 \text{ mm}$). Die mittleren Werte der Maximalkraft betragen 1,57 kN (1b-4), 1,75 kN (1b-6) und 1,77 kN (1b-5). Bis auf Probe 2 in Reihe 1b-5 wiesen alle Proben einen Mischbruch aus HCT980XD auf. Hier kam es zu einem Mischbruch, bei dem jedoch der Butzen nicht bis zur Blechoberfläche ausknöpfte. Es ist jedoch ein deutlicher Riss durch die Bruchoberfläche zu erkennen. Diese Probe zeigte weiterhin einen deutlichen Spritzer, der abgewandt von der Belastungsseite positioniert war (Bild 43). Probe 2 erreicht in dieser Versuchsreihe mit 1,93 kN die höchste Maximalkraft von insgesamt acht Wiederholversuchen. Der Spritzer hatte somit keine negativen Auswirkungen auf die Maximalkraft.

3.4.3 Versuchsreihe 1c

Die experimentellen Ergebnisse für die Schälzugproben Versuchsreihe 1c sind in Bild 44 grafisch dargestellt. Es wurden vier Versuchsreihen geprüft. Die Versuchsreihe 1c-1 konnte für Schälzug nicht experimentell getestet werden, da die hergestellten Proben keine ausreichende Verschweißung aufwiesen.

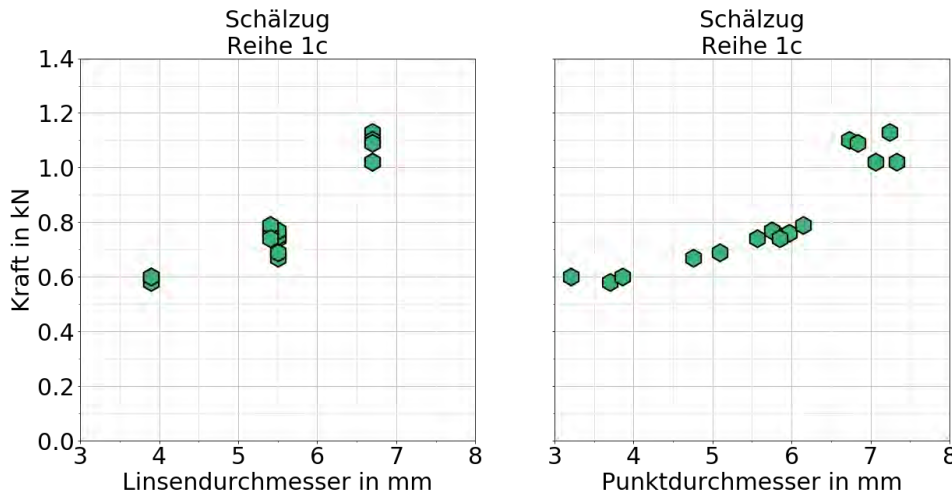


Bild 44
Exp. Ergebnisse der Schälzugproben mit HCT780XD ($t = 1,5 \text{ mm}$) und DC04 ($t = 1,0 \text{ mm}$)

Die Versuchsreihe bei $d_L = 6,7 \text{ mm}$ liegt höher als es der Trend zwischen den drei Reihen mit kleineren Linsendurchmessern erwarten lässt. Bei der Darstellung der Maximalkraft über den Punktdurchmesser ist ein deutlicher linearer Zusammenhang im Bereich von $3 \text{ mm} \leq d_p \leq 6,5 \text{ mm}$ zu erkennen. Die Versuche mit $d_p > 6,5 \text{ mm}$ fallen aus dem Trend heraus und haben eine deutlich größere Maximalkraft. In den Reihen 1a und 1b zeigten sich eher lineare Zusammenhänge, bzw. bei den Blechen mit HCT780XD $t < 1,5 \text{ mm}$ sogar ein Abflachen der Kraft für große Linsen-/Punktdurchmesser. Hier wurden jedoch fast ausschließlich Mischbrüche aus 22MnB5 beobachtet. In Reihe 1c kam es vorherrschend zu Laschenbildungen. Es ist denkbar, dass sich durch den geänderten Bruchmodus der Laschenbildung ein anderer Zusammenhang zwischen Linsendurchmesser und Maximalkraft ergibt. Gleichzeitig ist zu bedenken, dass für Laschenbildungen die Bestimmung des Punktdurchmessers ungenauer ist, da der Punkt nicht in zwei Richtungen ausgemessen und gemittelt werden kann.

Die Versuchsreihen 1c sind nach Größe des Linsendurchmessers sortiert 1c-4 ($d_L = 3,9 \text{ mm}$), 1c-5 ($d_L = 5,4 \text{ mm}$), 1c-3 ($d_L = 5,5 \text{ mm}$) und 1c-2 ($d_L = 6,7 \text{ mm}$). Die mittleren Maximalkräfte sind $0,59 \text{ kN}$ (1c-4), $0,76 \text{ kN}$ (1c-5), $0,72 \text{ kN}$ (1c-3) und $1,07 \text{ kN}$ (1c-2). In Reihe 1c-4 sind alle vier Proben aus HCT780XD ausgeknöpft. Für alle anderen Versuchsreihen kam es zu einer Laschenbildung in DC04.

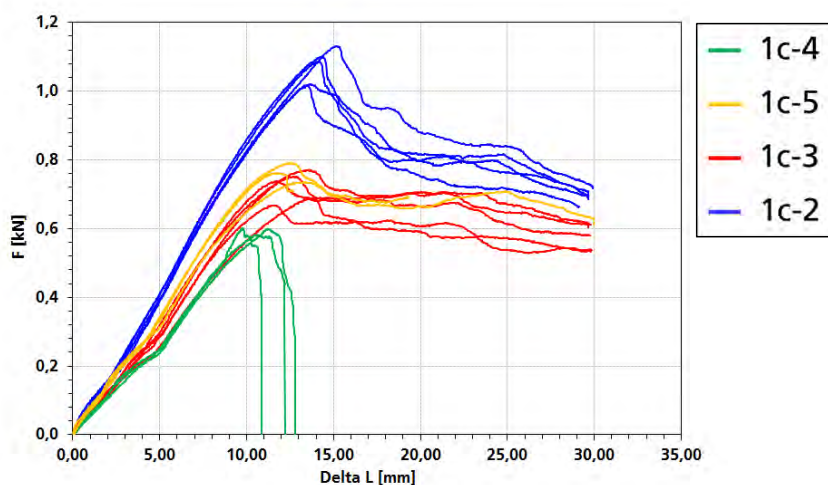


Bild 45
Kraft-Wegkurven der Versuchsreihen 1c mit HCT780XD ($t = 1,5 \text{ mm}$) und DC04 ($t = 1,0 \text{ mm}$) mit
1c-4 ($d_L = 3,9 \text{ mm}$)
1c-5 ($d_L = 5,4 \text{ mm}$)
1c-3 ($d_L = 5,5 \text{ mm}$)
1c-2 ($d_L = 6,7 \text{ mm}$)

In Versuchsreihe 1c-5 und 1c-3 sind die Linsendurchmesser fast identisch groß und somit auch die mittlere Maximalkraft. In Bild 45 sind alle Kraft-Wegkurven aus 1c darge-

stellt. Es ist zu erkennen, dass die Steifigkeit der Proben vom Linsendurchmesser abhängt. Desto größer der Linsendurchmesser, desto steifer verhält sich die Probe. Der größere Linsendurchmesser verkürzt den Hebel, außerdem ist ein schmalerer Teil der Probe verformbar. Die Kraft steigt deutlich mit zunehmendem Linsendurchmesser. Alle Proben weisen einen duktilen Bruch im Grundwerkstoff von DC04 auf. Der Werkstoff schnürt deutlich halbkreisförmig ein bevor es zum Bruch kommt. Bei größeren Linsendurchmessern, schnürt das Material über einen größeren Bereich ein, bevor es zum Bruch kommt.

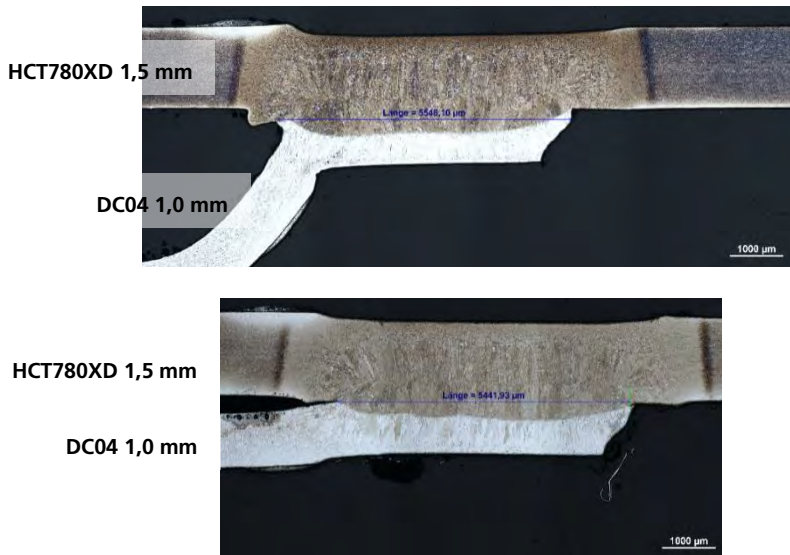


Bild 46
Gegenüberstellung von zwei Schlitzen der gebrochenen Probe 1c-3-Sa-4 (links) und der gebrochenen Probe 1c-5-Sa-2 (rechts) der Verbindung mit HCT780XD (1,5 mm) und DC04 (1,0 mm)

In Bild 46 sind zwei Schliffe gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass die Einschnürung in der Probe 1c-3-Sa-4 nicht an der Grenze der sichtbaren Kontur des Schweißguts erfolgt. Es ist ein zusätzlicher angebundener Bereich zu erkennen, der nicht der Rundung der Schweißlinse folgt. Es ist nicht eindeutig zu erkennen, ob hier ein Haften durch die Presskraft vorliegt und es sich nur um eine form-/kraftschlüssige Verbindung handelt oder ob das Material hier auch verschmolzen ist und eine stoffschlüssige Verbindung vorliegt. In Probe 1c-5-Sa-2 ist zu erkennen, dass der geöffnete Fügespalt an der Rundung der Schweißlinse endet.

Die Werkstoffe HCT780XD und DC04 zeigen deutlich unterschiedliche Helligkeiten im Schliff nach der Ätzung. Im unteren Schliff Bild 46 ist zu erkennen, dass die Mikrostruktur im DC04 Blech auch unter der vermeintlichen Schweißlinsengrenze stark beeinflusst wurde. Es ist unklar, ob es sich um Schweißgut oder Wärmeeinflusszone handelt, bzw. ob das Material hier bis oberhalb der Schmelztemperatur erhitzt wurde oder darunter verblieben ist.

3.4.4 Zusammenfassung der Schälzugversuche

Insbesondere für kleine Linsendurchmesser wurden starke Schwankungen beobachtet (Versuchsreihen 1a-4, 1a-7, 1a-14 und 1b-1). Dies konnte nicht auf Unterschiede in den Randbedingungen im Versuch oder auf Unterschiede im Linsendurchmesser zurückgeführt werden. Es ist zu vermuten, dass die Schwankungen durch kleinste Mikrostrukturunterschiede im Schweißgut zustande kommen. Diese Mikrostrukturunterschiede können den Riss entweder in Blechdickenrichtung ablenken und zu einem Mischbruch mit kleinem Ausknöpfungsteil führen oder zu einem reinen Fügeebenenbruch. Letzteres ist ein energetisch günstigerer Rissverlauf, wodurch die Verbindung nur ca. die Hälfte der Maximalkraft erreicht. Auf der Höhe dieser Maximalkraft ist ein Knick in der Kraft-Wegkurve zu erkennen. Bis dorthin verlaufen die Kraft-Wegkurven fast identisch.

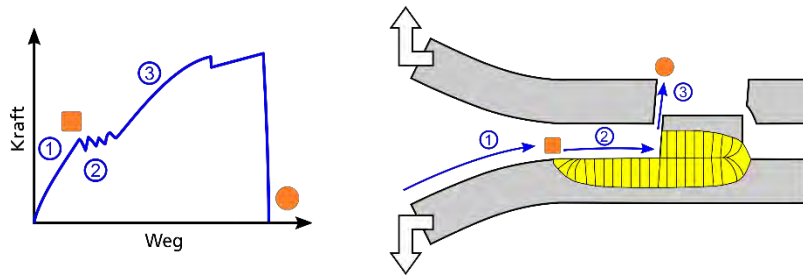


Bild 47
Schematische Darstellung des vermuteten Rissverlaufs mit Bezug zur Kraft-Wegkurve für Schälzugproben mit Mischbruch

Anhand der schematischen Skizze in Bild 68 soll der Rissverlauf für die unter Mischbruch versagten Proben rekonstruiert werden. Zunächst verformen sich die Schenkel der Probe ① und es kommt zu einer Belastung der Fügespaltwurzel und einem ersten Anriss in der Fügeebene ■. Der Rissverlauf entlang der Fügeebene zeigt einen unruhigen Verlauf in der Kraft-Wegkurve ②. Anschließend wird der Riss durch kleinste Änderungen in der Mikrostruktur abgelenkt und läuft in Richtung der Blechdicke weiter ③. Dadurch kommt es erneut zu einem deutlichen Kraftanstieg, bis die Probe vollständig ausknöpft ●.

Der Knick auf ungefähr der Hälfte der erreichten Maximalkraft in der Kraft-Wegkurve ist bei allen Schälzugversuchen für alle Reihen 1a, 1b und 1c zu erkennen. Nicht nur bei den Versuchsreihen an denen 22MnB5 beteiligt ist und es vorzugsweise zu Mischbruch kommt. An diesem Punkt hat sich der Schenkel der Probe maximal verformt und die Lokalisierung um den Schweißpunkt setzt ein.

Weiterhin war in Versuchsreihe 1a zu erkennen, dass für $d_L > 5\text{ mm}$ die Blechdicke einen deutlich größeren Einfluss auf die Maximalkraft hat als der Linsendurchmesser.

3.5 Experimentelle Ergebnisse der gleichartigen Schälzugversuche

3.5.1 Versuchsreihe 2

In Versuchsreihe 2 wurden gleichartige Schälzugproben geprüft. Beide Fügepartner sind aus 22MnB5. In Reihe 2-1 und 2-2 ist die Blechdicke 1 mm. In Reihe 2-3 ist die Blechdicke 2,0 mm und in Reihe 2-4 ist sie 1,5 mm. Die dazugehörigen Kraft-Wegkurven sind in Bild 48 dargestellt. Für Versuchsreihe 2-3 sind nur drei Kurven dargestellt, da die Messung für Probe 3 fehlgeschlagen ist.

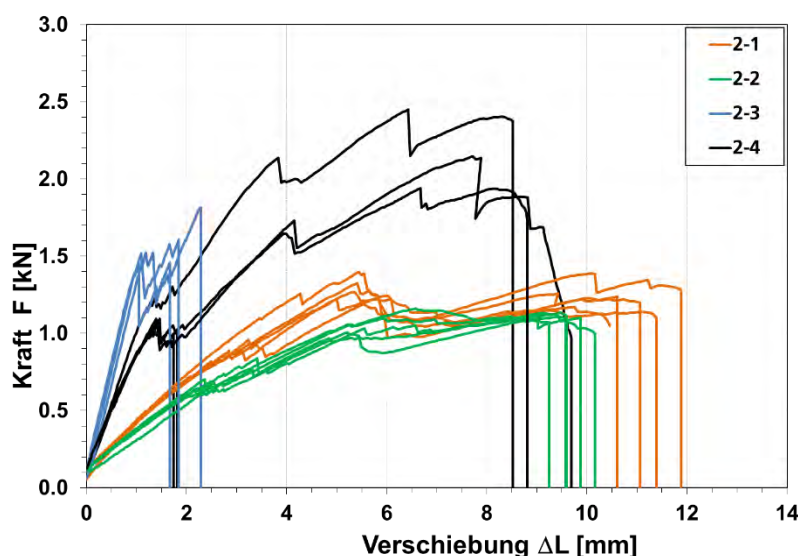


Bild 48
Kraft-Wegkurven der Versuchsreihen 2 mit 2x 22MnB5 in

2-1 ($t = 1,0\text{ mm}$
und $d_L = 5,5\text{ mm}$)

2-2 ($t = 1,0\text{ mm}$
und $d_L = 4,8\text{ mm}$)

2-3 ($t = 2,0\text{ mm}$
und $d_L = 4,0\text{ mm}$)

2-4 ($t = 1,5\text{ mm}$
und $d_L = 5,5\text{ mm}$)

Die mittleren Punktdurchmesser sind $d_p = 6,2 \text{ mm}$ (2-1), $d_p = 5,4 \text{ mm}$ (2-2), $d_p = 5,5 \text{ mm}$ (2-3) und $d_p = 6,4 \text{ mm}$ (2-4). Die beiden Versuchsreihen mit Blechdicke 1 mm zeigen nur wenig Unterschied. In Versuchsreihe 1a war bereits zu beobachten, dass bei Linsendurchmessern $d_L > 5 \text{ mm}$ der Einfluss des Linsendurchmessers auf die Maximalkraft klein war. Die Ergebnisse der gleichartigen Verbindung zeigen für Blechdicke 1 mm den gleichen Trend.

Auffällig ist der Unterschied der Maximalkraft zwischen 2-3 ($t = 2 \text{ mm}$) und 2-4 ($t = 1,5 \text{ mm}$). Die Verbindung 2-3 hat einen kleineren Linsendurchmesser jedoch auch ein deutlich dickeres Blech. In Reihe 2-3 sind alle Proben in der Fügeebene abgeschert (Bild 49).

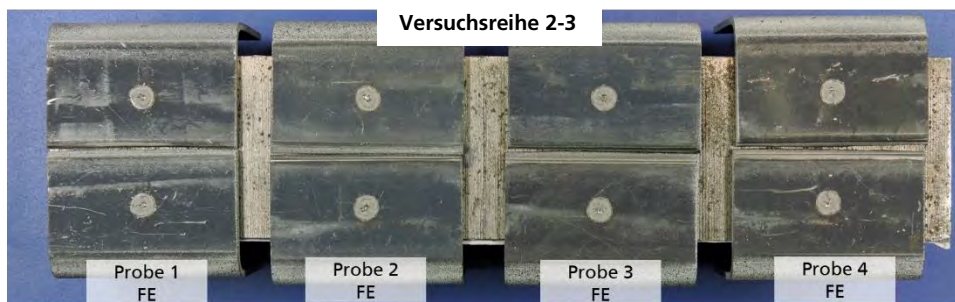


Bild 49
Probenbilder nach Versagen für die Reihe 2-3
22MnB5 (2,0 mm) –
22MnB5 (2,0 mm)

In Reihe 2-4 sind 2 Proben in der Fügeebene abgeschert, drei Proben haben durch Mischbruch versagt (Bild 50). Die abgescherten Proben zeigen ein deutlich niedrigeres Kraftniveau als die durch Mischbruch versagten Proben der gleichen Versuchsreihe.

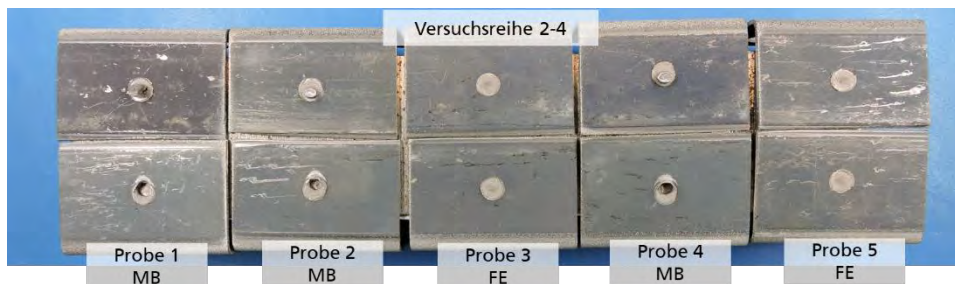


Bild 50
Probenbilder nach Versagen für die Reihe 2-4
22MnB5 (1,5 mm) –
22MnB5 (1,5 mm)

Die abgescherten Proben der Versuchsreihe 2-4 haben eine mittlere Maximalkraft von 1,08 kN. Demgegenüber haben die durch Mischbruch versagten Proben der Reihe 2-4 eine mittlere Maximalkraft von 2,18 kN. Dieses Phänomen konnte bereits in den Versuchsreihen der ungleichartigen Schälzugversuche beobachtet werden. Der Wechsel von Fügeebenenbruch zu Mischbruch geht mit einem erheblichen Zugewinn an Maximalkraft einher.

Die mittlere Maximalkraft der Proben aus Reihe 2-3 beträgt 1,63 kN. Sie ist etwas höher als die mittlere Maximalkraft der abgescherten Proben aus 2-4.

3.6 Experimentelle Ergebnisse der Dreiblechverbindungen

Es wurden zwei verschiedene Dreiblechverbindungen untersucht. Für Versuchsreihe 3 ist es die Kombination HCT980XD (1,5 mm) – HCT600XD (1,5 mm) – HCT600XD (1,5 mm), für Versuchsreihe 4 die Kombination 22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (1,5 mm) – DC04 (1,0 mm). Die Verbindungen wurden am Laboratorium für Werkstoff- und Füge-technik LWF in Paderborn geschweißt.

Die Dreiblechverbindungen wurden in unterschiedlichen Lasteinleitungsfällen unter drei Belastungsarten Scherzug, Kopfzug und Schälzug geprüft.

	Fall O-U (lies: <i>Oben gegen Unten</i>)	Fall M-U (lies: <i>Mitte gegen Unten</i>)	Fall OM-U (lies: <i>Oben und Mitte gegen Unten</i>)	Fall O-M (lies: <i>Oben gegen Mitte</i>)	Fall OU-M (lies: <i>Oben und Unten gegen Mitte</i>)
Scherzug					
Kopfzug					
Schälzug					

Tabelle 10 Nomenklatur zur Beschreibung der Lastfälle bei Dreiblechverbindungen

In Tabelle 10 sind die möglichen Lasteinleitungsfälle (kurz: Lastfall oder Fall) für Dreiblechverbindungen schematisch dargestellt. In den Lastfällen M-U, OM-U und O-M wird nur eine Fügeebene belastet. Im Fall O-U und OU-M werden zwei Fügeebenen belastet. Das Blech, das keinen Lastangriff erfährt (wie z.B. das mittlere Blech im Fall O-U), wird als passives Blech bezeichnet.

3.6.1 Versuchsreihe 3

In Bild 52 sind die experimentellen Ergebnisse für die Dreiblechverbindung mit HCT980XD (1,5 mm) – HCT600XD (1,5 mm) – HCT600XD (1,5 mm) unter Scherzugbelastung dargestellt. Die Höhe der Säule zeigt die mittlere Maximalkraft aus drei Wiederholversuchen an. Die Maximalkräfte der Wiederholversuche sind als Punkte dargestellt, um die Streuung darzustellen. Die Streuung war für alle Lastfälle klein.

Der Schweißlinsendurchmesser dieser Verbindung beträgt in beiden Fügeebenen $d_L = 6,8 \text{ mm}$. Zum Vergleich wurden für die Belastungsart Scherzug Zweiblechverbindungen mit gleichem Linsendurchmesser hergestellt. Die Ergebnisse für die Zweiblechverbindung HCT980XD (1,5 mm) – HCT600XD (1,5 mm) werden als Belastungsart 2-BV_O gekennzeichnet, die Zweiblechverbindung HCT600XD (1,5 mm) – HCT600XD (1,5 mm) werden als Belastungsart 2-BV_U gekennzeichnet.

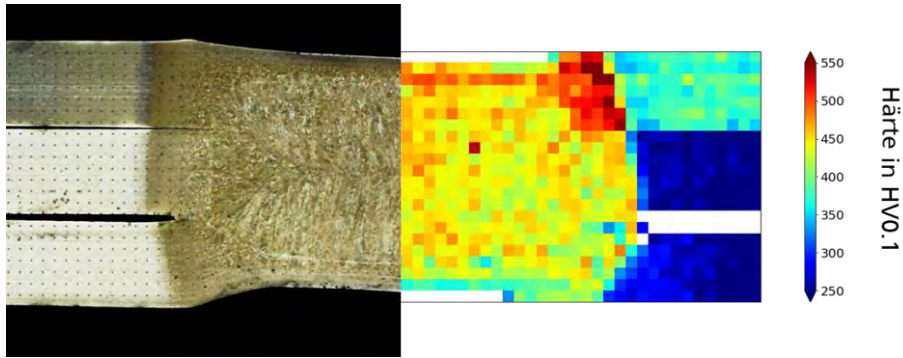


Bild 51
Schliff und Härtemessung
aus Nanoindentermes-
sung der Verbindung
HCT980XD (1,5 mm) –
HCT600XD (1,5 mm) –
HCT600XD (1,5 mm)

Bild 51 zeigt einen Schliff und eine Härtemessung einer ungeprüften Probe. Die Härteverteilung wurde mit Nanoindentermesung ermittelt. Im oberen Blech (HCT980XD) ist deutlich eine aufgehärtete Wärmeeinflusszone zu erkennen. Die Wärmeeinflusszone in HCT600XD hat ähnliche Härtewerte wie das Schweißgut. Das Schweißgut ist über die gesamte Linsenhöhe annähernd homogen. Die gemessene Erweichungszone in HCT980XD ist sehr schmal.

Die höchste Maximalkraft wurde für den Lastfall OU-M erreicht. Hier kam es zu einem Ausreißen des mittleren Blechs. In diesem Lastfall kann die Verbindung insbesondere bei einer symmetrischen Blechdickenkombination nicht rotieren. Das mittlere Blech wird von den äußeren Blechen gestützt. Im Versuchsaufbau sind die beiden äußeren Bleche zusammen in einer Einspannung fixiert, so dass sich hier die Kraft auf zwei Bleche verteilt. Auf der gegenüberliegenden Seite wird das mittlere Blech einzeln eingespannt und muss alleine die Kraft aufnehmen.

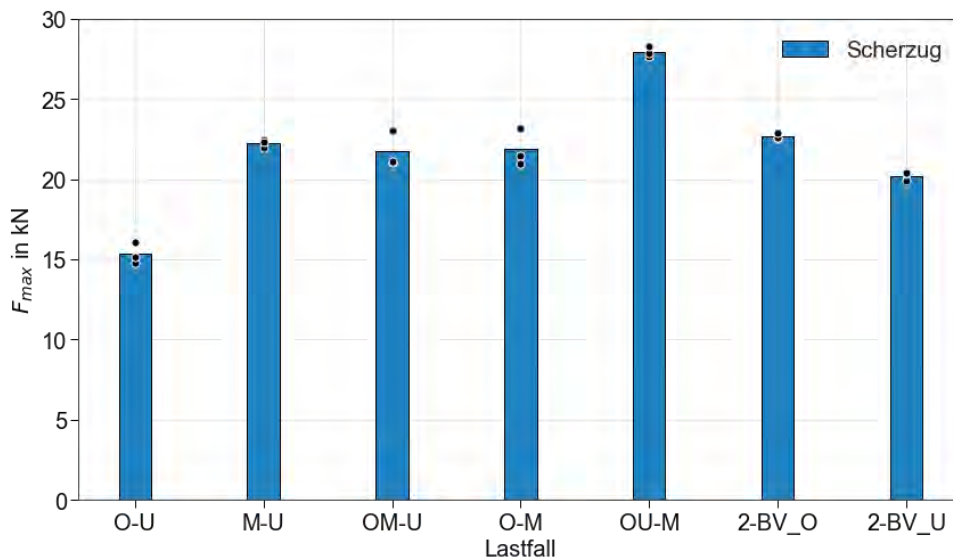


Bild 52
Mittelwert der Maximal-
kräfte für Dreiblechver-
bindungen HCT980XD
(1,5 mm) – HCT600XD (1,5
mm) – HCT600XD (1,5
mm) für unterschiedliche
Lastfälle
und
Ergebnisse der Maximal-
kräfte für die Zweiblech-
verbindung 2-BV_O mit
HCT980XD (1,5 mm) –
HCT600XD (1,5 mm) und
2-BV_U mit HCT600XD
(1,5 mm) – HCT600XD (1,5
mm) für Scherzug

In den Lastfällen M-U und OM-U wird die untere Fügeebene belastet. Beide Lastfälle haben aufgrund ihrer Lasteinleitung vergleichbare lokale Belastungsverhältnisse. Die erreichten Maximalkräfte sind fast identisch. Für beide Lastfälle kam es jeweils zweimal zu einem Fügeebenenbruch in der unteren Fügeebene und jeweils einmal zu einem Ausknöpfen aus dem unteren HCT600XD Blech. Die Maximalkraft der Zweiblechverbindung HCT600XD (1,5 mm) – HCT600XD (1,5 mm) erreichte etwas kleinere Werte. Aufgrund der kleineren Blechpaketdicke rotiert die Verbindung mehr und es wird ein größerer Normkraftanteil auf die Fügestelle aufgebracht (Bild 53). Der Schweißpunkt knöpfte in allen drei Wiederholversuchen beidseitig aus.

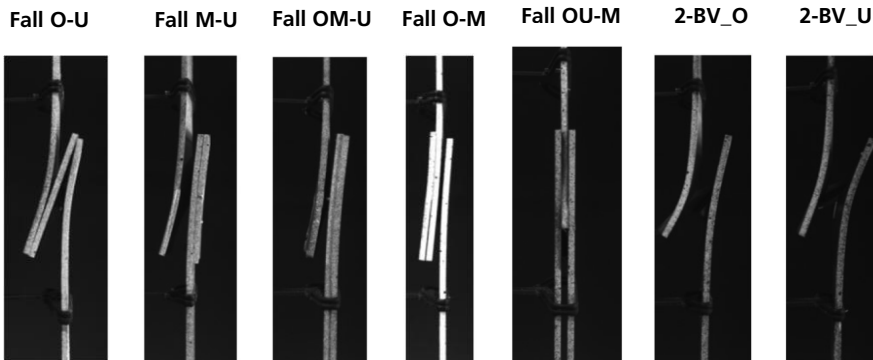


Bild 53
Aramis Aufnahme einer repräsentativen Probe für jeden Lasteinleitungsfall bei Erreichen des Kraftmaximums

Bei Belastung der oberen Fügeebene in Lastfall O-M wird eine ähnliche Maximalkraft wie für die Lastfälle M-U und OM-U erreicht. Der Versagensmodus ist jedoch ein Abscheren in der Fügeebene HCT980XD/HCT600XD (Bild 54). Ein Vergleich mit der korrespondierenden Zweiblechverbindung zeigt, dass hier ähnliche Maximalkräfte erreicht werden. Die Bruchart der Zweiblechverbindung zeigt jedoch ein Ausknöpfen aus HCT600XD. Der Riss verläuft außerhalb der Wärmeeinflusszone im Grundwerkstoff. Das HCT600XD Blech der Zweiblechverbindung verformt deutlich, was die Lokalisierung auf dieser Blechseite begünstigt.

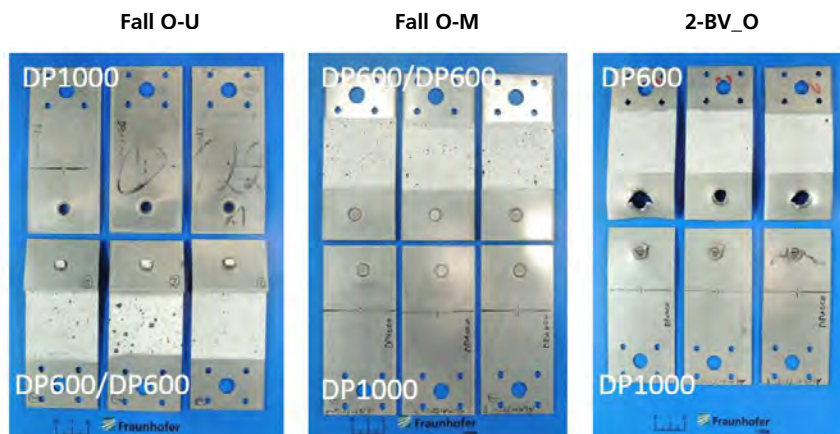


Bild 54
Bruchbilder der Versuchsreihe 3 unter Scherzug für Fall O-U, Fall O-M und Zweiblech 2-BV_O

Im Fall O-U werden beide Fügeebenen belastet. Die Belastung wirkt sowohl auf die Fügeebene HCT980XD/ HCT600XD als auch die Fügeebene HCT600XD/HCT600XD. Die Versagenkraft ist deutlich kleiner als für alle anderen Lastfälle unter Scherzug. Es ist der einzige Lastfall bei dem ein Ausknöpfen aus HCT980XD auftritt. Der Riss verläuft hier entlang der Schweißblinsengrenze zwischen Schweißgut und Wärmeeinflusszone. In dieser Anordnung ist eine vergleichsweise große Rotation der Dreiblechverbindung möglich im Gegensatz zu den anderen Lastfällen der Dreiblechverbindungen (Bild 53). Dadurch erhöht sich der Kopfzuganteil auf die Fügestelle. Gleichzeitig kann sich das außenliegende HCT600XD Blech nur wenig deformieren. Hochfeste Stähle wie HCT980XD zeigen unter Kopfzug eine Tragfähigkeitsminderung. Dieser Effekt kommt auch hier zu tragen.

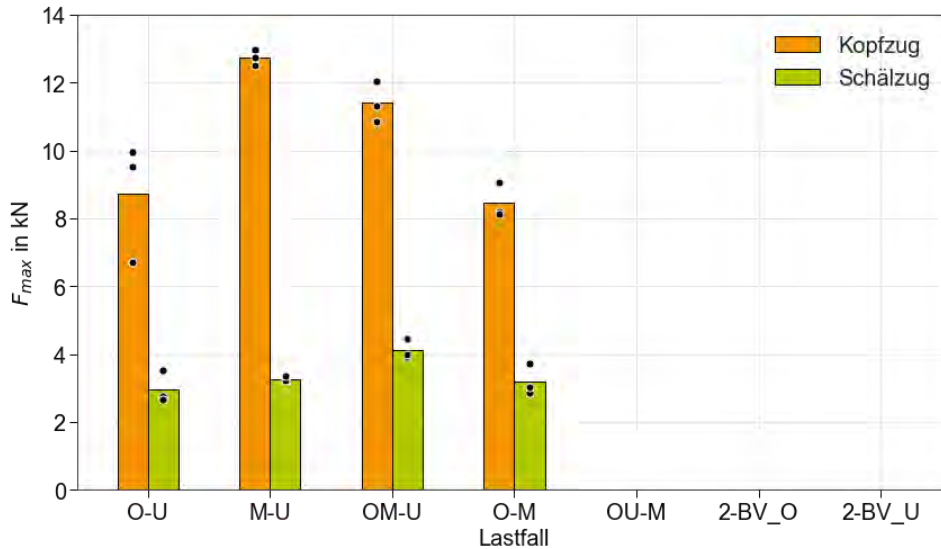


Bild 55
Mittelwert der Maximalkräfte für Dreiblechverbindungen HCT980XD (1,5 mm) – HCT600XD (1,5 mm) – HCT600XD (1,5 mm) für unterschiedliche Lastfälle für Kopfzug und Schälzug

In Bild 55 sind die Ergebnisse der Kopfzug- und Schälzugversuche für Versuchsreihe 3 dargestellt. Es wurden jeweils vier Lastfälle geprüft. Die höchste Maximalkraft erreicht der Lastfall M-U. Die untere Fügeebene wird auch in Lastfall OM-U belastet. Für Scherzug waren die beiden Lastfälle vergleichbar in Maximalkraft. Unter Kopfzug zeigt der Fall OM-U eine kleinere Maximalkraft. Im Fall M-U sind alle Proben zwischen Grundwerkstoff und Wärmeinflusszone aus dem außenliegenden HCT600XD Blech ausgeknöpft. Im Fall OM-U wurde dieser Versagensfall für eine Probe beobachtet. Diese Probe erreichte eine ähnliche Maximalkraft wie die Proben aus Fall M-U. Bei zwei Proben in Fall OM-U knöpft der Schweißpunkt entlang der Schweißlinse aus. Diese Proben erreichten eine deutlich niedrigere Kraft. Ein Vergleich der Kraft-Wegkurven dieser beiden Lasteinleitungsfälle zeigt wenig Unterschiede in der Steifigkeit.

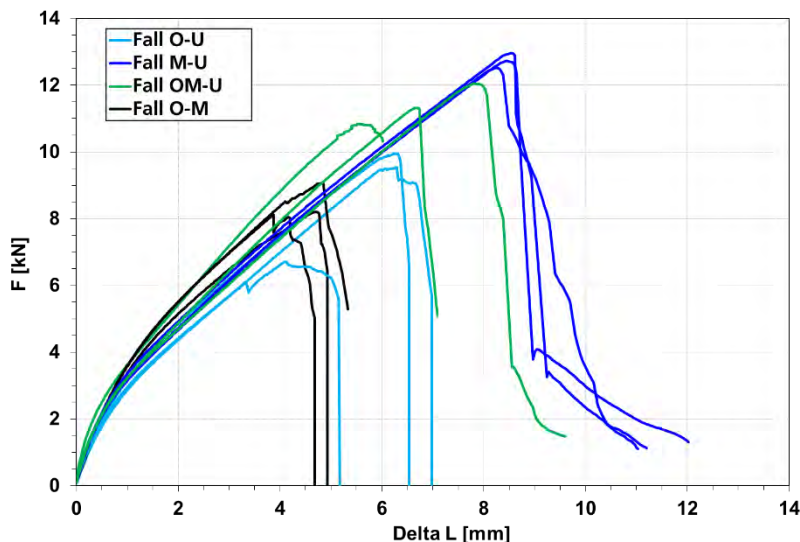


Bild 56
Kraft-Wegkurven der Versuchsreihe 3 unter Kopfzug für alle Lastfälle

In Fall O-M und Fall O-U sind alle Proben aus HCT980XD entlang der Linsengrenze ausgeknöpft. Im Fall O-U werden höhere Bruchverschiebungen erreicht (Bild 56). Im Fall O-M führt das außenliegende passive Blech zu einer höheren Steifigkeit der Probe. Im Fall O-U können sich die beiden außenliegenden Bleche frei deformieren. Dadurch kann das außenliegende HCT600XD Blech mehr Kraft aufnehmen und die Proben versagen

später. Obwohl alle Proben für Fall O-U das gleiche Bruchbild zeigen, kam es für eine Probe zu einer deutlich niedrigeren Versagskraft. Die Ursache hierfür ist unklar.

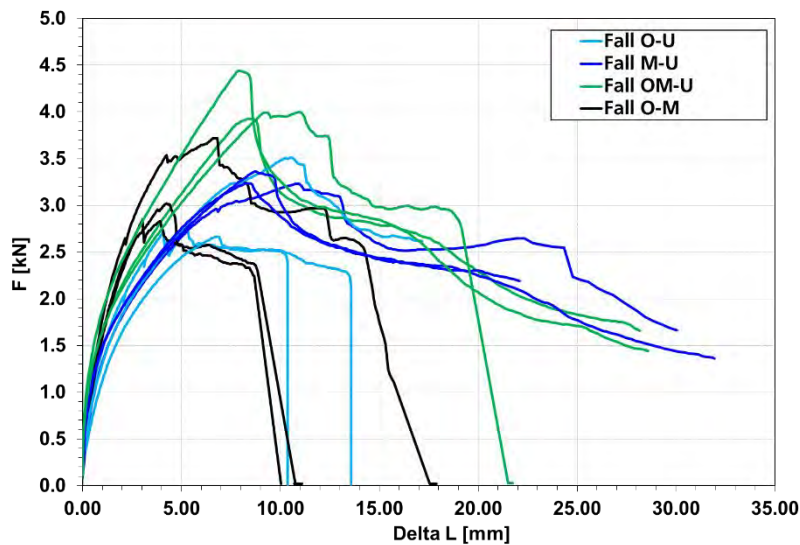


Bild 57
Kraft-Wegkurven der Versuchsreihe 3 unter Schälzug für alle Lastfälle

Die Schälzugproben erreichen deutlich niedrigere Maximalkräfte als die Scherzug- und Kopfzugproben. Die höchste Maximalkraft wird für den Lastfall OM-U erreicht. Die Maximalkraft im Fall M-U, für den die gleiche Fügeebene belastet wird, hat eine etwas niedrigere Maximalkraft. Es ist ein gegenteiliger Trend im Vergleich zu Kopfzug zu erkennen. Unter Kopfzug wurde für den Lastfall M-U eine höhere Maximalkraft erreicht als für OM-U. Grund hierfür sind die unterschiedlichen Versagensarten. Unter Schälzug zeigten alle drei Wiederholversuche für Fall M-U und zwei Wiederholversuche für Fall OM-U eine Laschenbildung im außenliegenden HCT600XD Blech. Ein Wiederholversuch für Fall OM-U knöppte aus dem unteren Blech (HCT600XD) aus.

Im Fall O-U knöppte eine Probe aus HCT980XD aus, die beiden andere Proben knöpften aus HCT600XD aus. Dabei zeigte eine Probe einen Ansatz zur Laschenbildung aus HCT600XD. Diese Probe hat eine deutlich höhere Versagskraft als die beiden anderen Proben dieser Wiederholserie.

3.6.2 Versuchsreihe 4

Die experimentellen Ergebnisse für die Dreiblechverbindung mit 22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (1,5 mm) – DC04 (1,0 mm) sind in Bild 58 und Bild 59 dargestellt. Der nominelle Schweißlinsendurchmesser beträgt in der oberen Fügeebene 6,9 mm und in der unteren Fügeebene 5,2 mm. Der tatsächlich erreichte Linsendurchmesser schwankt trotz gleicher Schweißparametereinstellungen. In einzelnen Schliften sind daher Abweichungen von den nominellen Linsendurchmessern zu erkennen (Bild 62s). Zum Vergleich sind die Ergebnisse für Zweiblechverbindungen aus Versuchsreihe 1a für die Materialkombination 22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (1,5 mm) dargestellt, die einen ähnlichen Linsendurchmesser aufweisen. Dies sind für die Belastungsarten Scherzug und Schälzug die Versuchsreihe 1a-5 und für Kopfzug die Versuchsreihe 1a-15. Sie werden in den Diagrammen als Belastungsart 2-BV_O bezeichnet. Zum Vergleich mit der unteren Fügeebene sind die Ergebnisse für die Zweiblechverbindungen aus Versuchsreihe 1c für die Materialkombination HCT780XD (1,5 mm) – DC04 (1,0 mm) dargestellt. Die Versuchsreihen mit den ähnlichsten Linsendurchmessern sind hier die Versuchsreihen 1c-3 für Scherzug und Schälzug und die Versuchsreihe 1c-4 für Kopfzug. Im Gegensatz der Dreiblechverbindung der Versuchsreihe 3 ist diese Verbindung nicht symmetrisch in der Blechdicke. Zusätzlich ist der Unterschied in den Zugfestigkeiten deutlich höher.

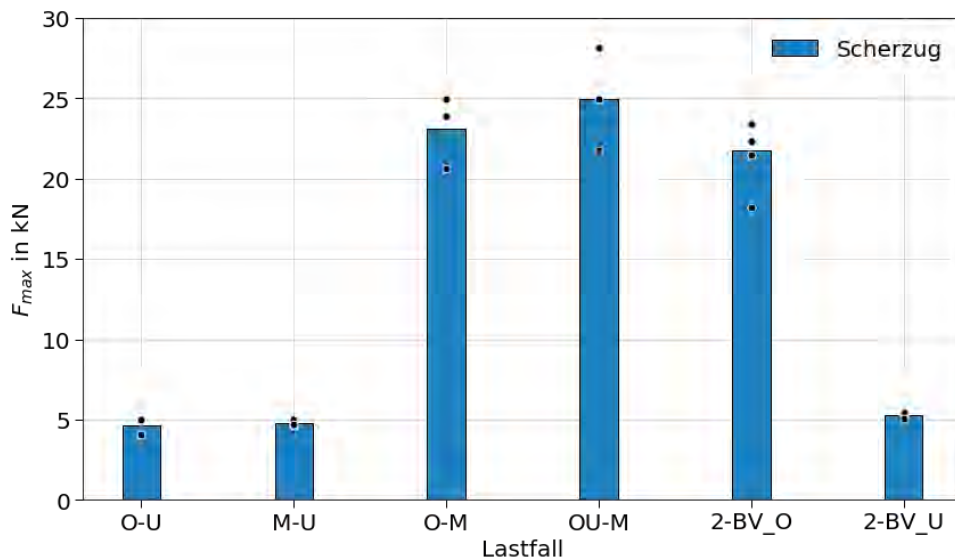


Bild 58
Mittelwerte der Maximalkräfte für Dreiblechverbindungen 22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (1,5 mm) – DC04 (1,0 mm) für unterschiedliche Lastfälle und Ergebnisse der Maximalkräfte für die Zweiblechverbindung 2-BV_O mit 22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (1,5 mm) und 2-BV_U mit HCT780XD (1,5 mm) – DC04 (1,0 mm) unter Scherzug

Der Lastfall OU-M zeigt Werkstoffversagen in HCT780XD (1,5 mm). Für diesen Lastfall wurde die höchste Maximalkraft erreicht. Der Lastfall mit der nächstgrößeren Maximalkraft ist Fall O-M. Hier sind alle drei Wiederholversuche aus 22MnB5 ausgeknöpft. Die Maximalkraft ist etwas höher als die vergleichbare Zweiblechverbindung mit 22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (1,5 mm). Wird die untere Fügeebene belastet, ist die Maximalkraft deutlich kleiner. Für den Fall M-U erreicht die Maximalkraft (4,8 kN) nur ein Fünftel der Maximalkraft von Fall O-M (23,1 kN). Alle drei Wiederholversuche von Fall M-U zeigen eine Laschenbildung in DC04. In Fall O-U wird die gleiche Maximalkraft wie im Fall M-U erreicht. Hier haben zwei Wiederholversuche ebenfalls eine Laschenbildung in DC04 gezeigt. Eine weitere Probe ist aus DC04 ausgeknöpft.

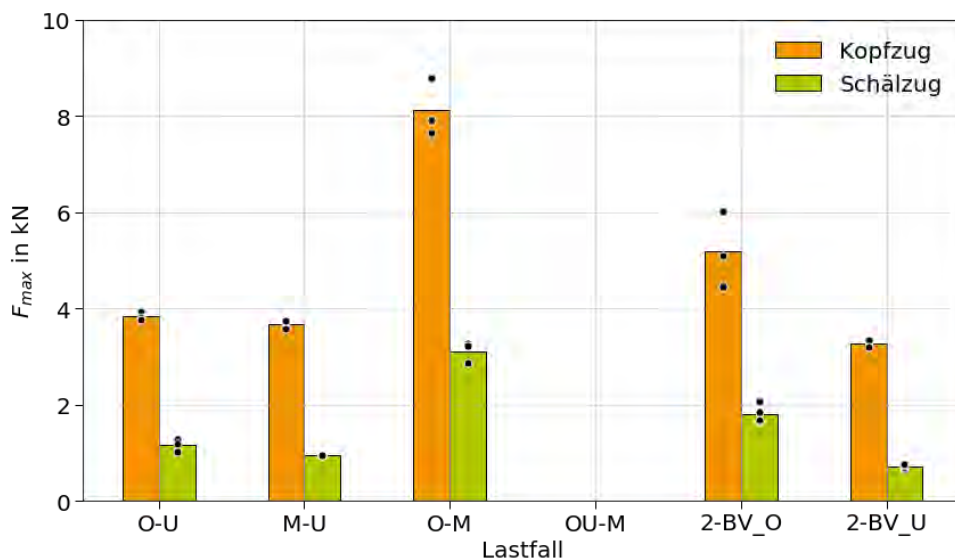


Bild 59
Mittelwerte der Maximalkräfte für Dreiblechverbindungen 22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (1,5 mm) – DC04 (1,0 mm) für unterschiedliche Lastfälle und Ergebnisse der Maximalkräfte für die Zweiblechverbindung 2-BV_O mit 22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (1,5 mm) und 2-BV_U mit HCT780XD (1,5 mm) – DC04 (1,0 mm) unter Kopfzug und Schälzug

Auch unter Kopfzug zeigt der Lastfall O-M eine höhere Maximalkraft als Lastfall M-U. Der Unterschied in der Maximalkraft zwischen Fall O-M und Fall M-U ist nicht so ausgeprägt wie bei Scherzug. Die Maximalkraft ist ca. doppelt so hoch. Die Maximalkraft der Zweiblechverbindung 22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (1,5 mm) ist deutlich niedriger als die Maximalkraft für Fall O-M. Die hier dargestellte Zweiblechverbindung (1a-15)

hat jedoch nur einen Linsendurchmesser von $d_L = 5,8 \text{ mm}$ (Bild 21). Die Dreiblechverbindung hat in dieser Fügeebene einen nominellen Linsendurchmesser von $d_L = 6,9 \text{ mm}$. Daher sind die Verbindungen nicht direkt vergleichbar. Es ist anzunehmen, dass die Verbindung 22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (1,5 mm) unter Kopfzug mit einem Linsendurchmesser von 6,9 mm deutlich höhere Maximalkräfte erreicht, als die hier dargestellte Verbindung. Ob eine solche Verbindung die Maximalkraft der Dreiblechverbindung für Fall O-M erreicht ist unklar. Die Dreiblechverbindungen zeigen im Fall O-M einen leichten Mischbruch für alle drei Wiederholversuche. Im Fall M-U und Fall O-U ist ein Ausknöpfen aus DC04 zu beobachten. Für Versuchsreihe 3 hatten der Fall O-U und der Fall O-M das gleiche Bruchbild. In Versuchsreihe 4 haben der Fall O-U und der Fall M-U das gleiche Bruchbild.

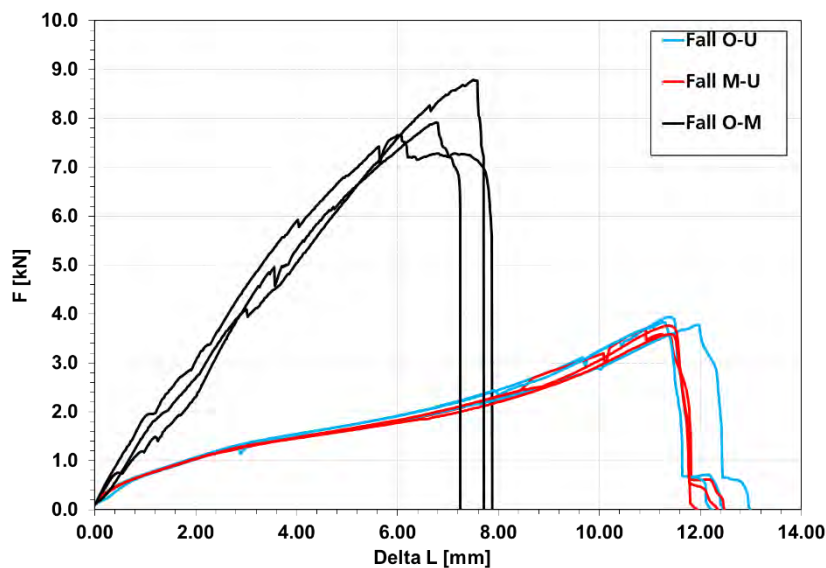


Bild 60
Kraft-Wegkurven der Versuchsreihe 4 unter Kopfzug für alle Lastfälle

Die Bruchverschiebung ist in den zu vergleichenden Fällen der Versuchsreihe 4 ähnlich, während in Versuchsreihe 3 der Fall O-U eine deutlich größere Bruchverschiebung zeigte (Bild 60). Dies hängt vermutlich mit dem deutlich größeren Festigkeitsunterschied zwischen oberen und unteren Blech in Versuchsreihe 4 zusammen. Die gesamte plastische Verformung wird im unteren Blech aufgenommen.

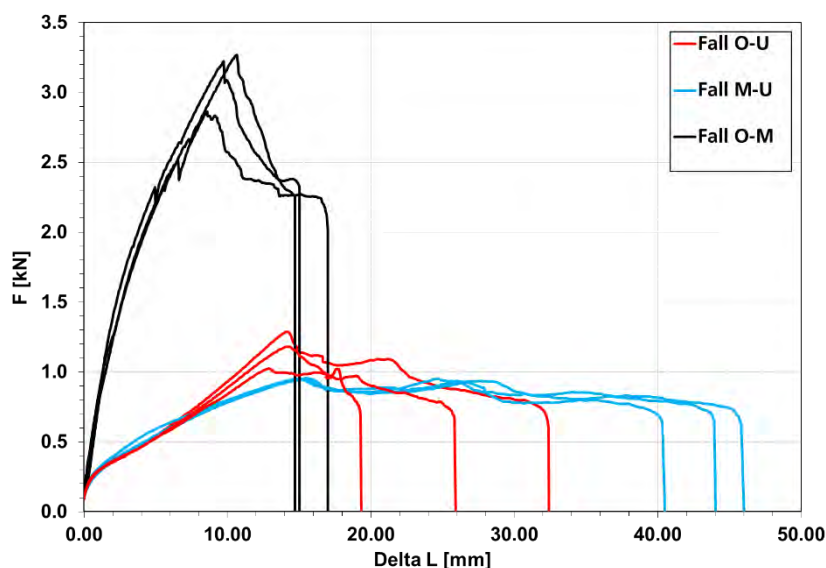


Bild 61
Kraft-Wegkurven der Versuchsreihe 4 unter Schälzug für alle Lastfälle

Für die Schälzugversuche zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den Kopfzugversuchen (Bild 59). Die Verhältnisse der Maximalkräfte der Lastfälle untereinander ist ähnlich. Der Fall O-U, der Fall M-U und die Zweiblechverbindung der korrespondierenden unteren Ebene haben ähnliche Maximalkräfte. Der Lastfall O-M hat die höchste Maximalkraft. Die Steifigkeit dieser Probe ist deutlich größer als für Fall O-U und Fall M-U (Bild 61). Die Zweiblechverbindung hat einen Linsendurchmesser von $d_L = 6,6 \text{ mm}$. Der Versagensmodus war Mischbruch aus 22MnB5. Die Dreiblechverbindung zeigt keinen Mischbruchanteil (Bild 62). Die drei Wiederholversuche für Fall O-M sind aus 22MnB5 ausgeknöpft.

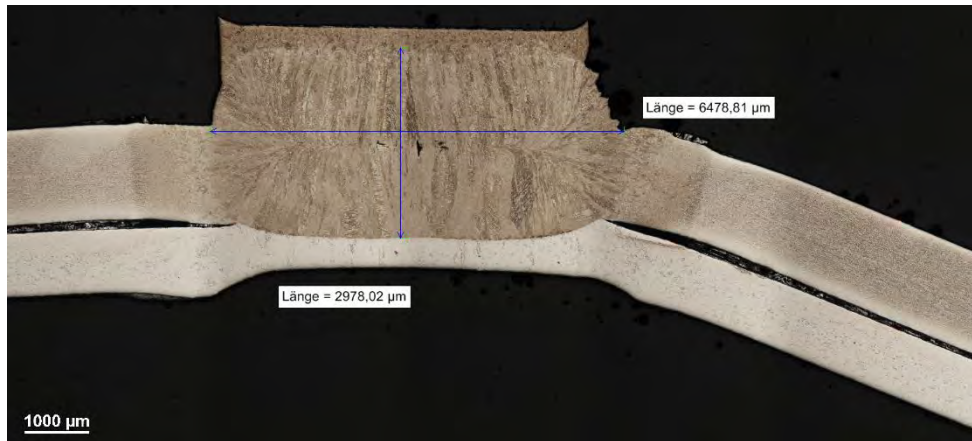


Bild 62
Schliff einer gebrochenen Probe der Dreiblechverbindung 22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (1,5 mm) – DC04 (1,0 mm) für den Lastfall O-M unter Schälzugbelastung

3.6.3 Zusammenfassung Dreiblechverbindungen

Für Dreiblechverbindungen sind unterschiedliche Lastfälle möglich. Wie die Belastung an der Fugestelle wirkt, hängt vom angreifenden Lastfall ab. Für den Lastfall O-M wird die obere Fügeebene belastet, für den Lastfall M-U wird die untere Fügeebene belastet und für Lastfall O-U werden beide Fügeebenen belastet.

Die Maximalkraft für Fall O-U richtet sich in der Regel nach der kleineren Maximalkraft aus Fall O-M und Fall M-U. Eine der Fügeebenen ist schwächer und versagt im Fall O-U als erstes. In den beiden untersuchten Verbindungen zeigte Verbindung 3 unter Scherzug für den Fall O-U eine deutlich niedrigere Maximalkraft als Fall O-M und auch als Fall M-U. Grund hierfür ist eine höhere Rotation der Probe im Fall O-U, weshalb es zu einem größeren Kopfzuganteil der Belastung an der Fugestelle kommt. Die Fugestelle im HCT980XD Blech ist empfindlich gegenüber Kopfzugbelastung wodurch es zu einer Minderung der Maximalkraft und einem Ausknöpfen aus HCT980XD kommt. Die Maximalkraft im Fall O-U ist außerdem deutlich niedriger als die Zweiblechverbindung HCT980XD/HCT600XD. Die Zweiblechverbindung knöpft aus HCT600XD aus und zeigt einen deutlichen Grundwerkstoffanteil am Butzen. Der HCT600XD verformt deutlich bei Belastung der Zweiblechverbindung, wodurch es zu einer Lokalisierung der Dehnung um den Schweißpunkt im HCT600XD Blech kommt. Bis zum Bruch kann die lokalisierte Zone Verformungsenergie aufnehmen und es kommt zu einer Krafterhöhung. In den Zweiblechverbindungen wird unter Scherzug nicht die gleiche Belastungssituation erzeugt, wie in den Lastfällen der Dreiblechverbindungen.

Unter keiner Belastungsart und für keine der beiden Verbindungen zeigt der Fall O-U eine größere Maximalkraft als die kleinere der beiden Maximalkräfte aus Fall O-M oder Fall M-U.

Für Verbindung 3 ist unter Kopfzug die obere Ebene (HCT980XD/HCT600XD) die schwächere Ebene und Fall O-M hat die kleinste Maximalkraft. Der Fall O-U zeigt die gleiche Maximalkraft wie Fall O-M. Die Maximalkraft im Fall M-U ist deutlich größer. Für Verbindung 4 ist unter Kopfzug die untere Ebene (HCT780XD/DC04) schwächer.

Fall O-U hat die gleiche Maximalkraft wie Fall M-U. Die Maximalkraft im Fall O-M ist deutlich größer.

Unter Schälzug zeigt sich für Verbindung 4 das gleiche Bild. Der Fall O-M hat ein deutlich größeres Kraftmaximum als Fall O-U und Fall M-U. Die letzteren beiden Fälle haben ungefähr die gleiche Maximalkraft. Für Verbindung 3 verhält es sich anders. Alle drei Lastfälle, d.h. Fall O-U, Fall M-U und Fall O-M, haben unter Schälzug ein ähnliches Kraftniveau. Grund hierfür ist, dass die Maximalkraft bei Laschenbildung in HCT600XD zufällig ungefähr gleich groß ist wie die Maximalkraft bei Ausknöpfen aus HCT980XD unter Schälzug.

3.7 Unterschiedliche Charakteristik im Bruchverhalten bei Scherzugversuchen

Für die Scherzugproben wurde in den Versuchsergebnissen der vier Versuchsreihen 1a-6, 1b-2, 1b-3 und 1b-5 eine starke Streuung beobachtet. Der Unterschied zwischen der niedrigsten gemessenen Maximalkraft und der höchsten gemessenen Maximalkraft beträgt -23,6% (1a-6), -17,1% (1b-2), -23,7% (1b-3) und -35,0% (1b-5). Bei Betrachtung der Kraft-Wegkurven fällt auf, dass zwei unterschiedliche charakteristische Kurvenverläufe auftreten. Die Kurvenverläufe, für die ein hohes Kraftniveau erreicht wurde, zeigen einen glatten Kurvenverlauf bis zum Kraftmaximum auf. Danach kommt es zu einem abrupten Kraftabfall und anschließend zu einem kurzen Wiederanstieg der Kraft. Dann folgt ein zweiter Abfall und schließlich kommt es zum kompletten Bruch der Probe. Die Kurvenverläufe, für die ein niedriges Kraftniveau erreicht wurde, zeigen einen unruhigen Kraftverlauf bis zum Kraftmaximum und einen langsamen Abfall der Kraft bis es zum Bruch kommt (Bild 63).

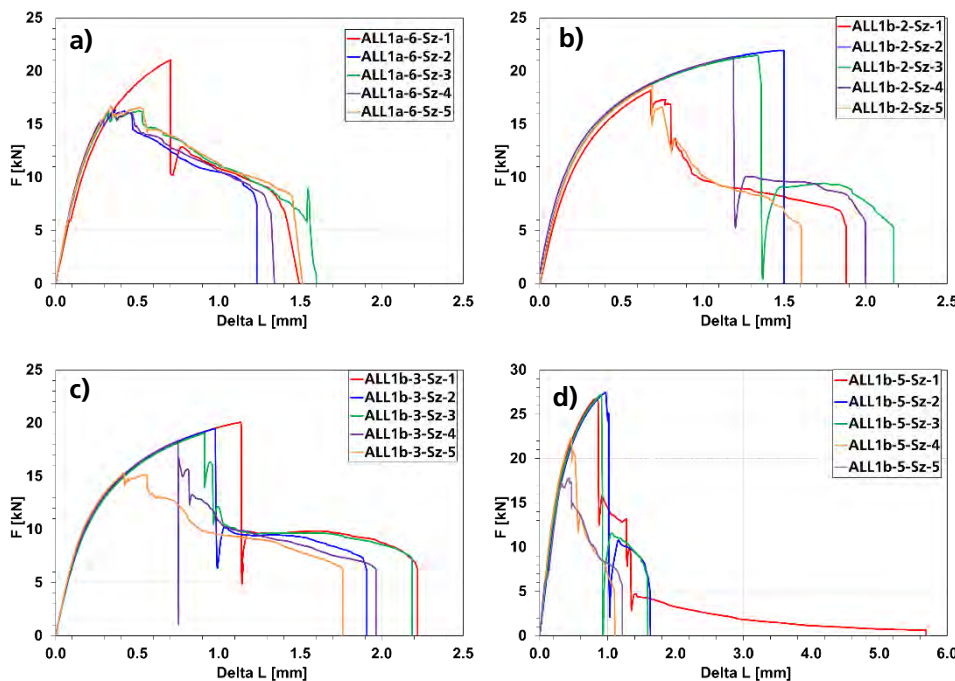


Bild 63
Kraft-Wegkurven der Versuchsreihen

a)
1a-6-Sz ($d_L = 5,7 \text{ mm}$)
22MnB5 (1,5 mm) –
HCT780XD (1,5 mm)

b)
1b-2-Sz ($d_L = 7,0 \text{ mm}$)
22MnB5 (1,5 mm) –
HCT600XD (1,5 mm)

c)
1b-3-Sz ($d_L = 6,5 \text{ mm}$)
22MnB5 (1,5 mm) –
HCT600XD (1,5 mm)

d)
1b-5-Sz ($d_L = 7,2 \text{ mm}$)
22MnB5 (1,5 mm) –
HCT980XD (1,5 mm)

Es wurden vier mögliche Ursachen für dieses Verhalten untersucht:

- (1) Unterschiede in der angebundenen Fläche
- (2) Unsymmetrische Schweißpunktposition auf der Probe
- (3) Auftreten und Position von Spritzern
- (4) Lokalisierung in der Erweichungszone

(1) Es wurden für jede der vier Versuchsreihen jeweils ein Schliff für eine Probe, die im oberen Niveau gebrochen ist, erstellt und eine Probe die im unteren Niveau gebrochen ist. Es gab keine deutlichen Unterschiede im Linsendurchmesser für die unterschiedlichen Kraftniveaus. Daher wurden zusätzlich für eine Versuchsreihe an zwei betroffenen Proben REM Aufnahmen der Bruchfläche angefertigt (Bild 64). Hier sollte geklärt werden, ob der angebundene Bereich für die Proben größer ist, als im Schliff zu erkennen. Die REM Aufnahme zeigt, dass der Riss entlang der Schweißlinse lief. Es ist ein sprödes Bruchbild zu erkennen, was darauf hinweist, dass es sich um Schweißgut handelt. Auf beiden Proben konnte ein Spritzer erkannt werden, der auch leichte Sprödbbruchanteile aufwies, was auf angebundene Bereiche hindeutet. Diese Bereiche sind jedoch nur schmale unterbrochene Bänder. Am oberen Rand des Butzens ist die Bruchfläche duktil. Es handelt sich um Grundwerkstoff oder Wärmeeinflusszone. Die REM Aufnahmen zeigten keine Indizien, die den Unterschied im Kraftniveau erklären konnten. Die REM-Aufnahmen beider Proben zeigen ein qualitativ ähnliches Bruchbild. Es können keine signifikanten Unterschiede, die auf unterschiedlich große angebundene Flächen hinweisen, festgestellt werden.

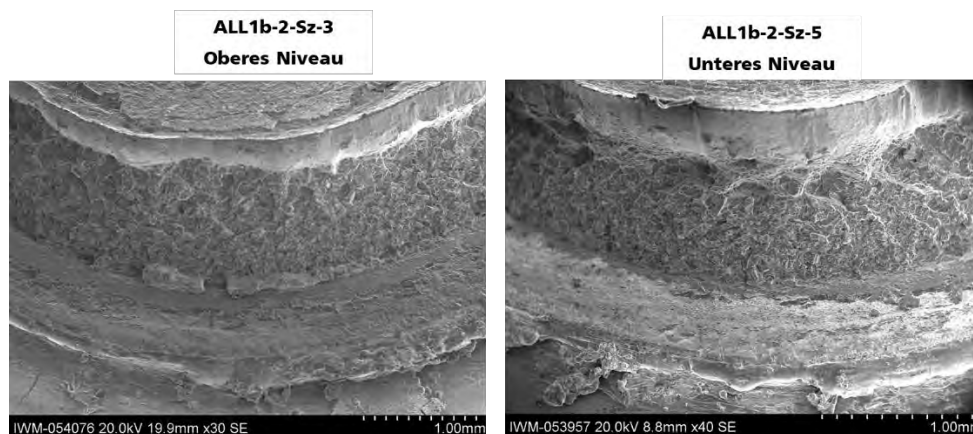


Bild 64
REM Aufnahmen der
Bruchflächen auf der Zug-
seite 22MnB5

1b-2-Sz ($d_L = 7,0 \text{ mm}$)
22MnB5 (1,5 mm) –
HCT600XD (1,5 mm)

(2) Bei Verwendung eines Lochbilds zur Einspannung der Probe in der Prüfmaschine kann der Schweißpunkt mittig ausgerichtet werden. Damit wird sichergestellt, dass die Verbindung symmetrisch belastet wird. Mit der hier verwendeten hydraulischen Einspannung ist eine Ausrichtung nicht möglich. Es muss in jedem Fall sichergestellt werden, dass sich der Schweißpunkt mittig auf der Probe befindet, damit der Kraftfluss nicht außermittig verläuft. An den Probenbildern konnten jedoch keine offensichtlich außermittig geschweißten Proben identifiziert werden (Bild 65).

(3) Bild 66 und Bild 67 zeigen Schliffbildern von jeweils zwei Proben einer Versuchsreihe. Dabei zeigte eine Probe ein hohes Kraftniveau, die andere das niedrigste Kraftniveau. In der Versuchsreihe 1b-5 befindet sich auf der Zugseite des 22MnB5 Blechs der gebrochenen Probe des oberen Kraftniveaus ein deutlicher Spritzer, für das untere Kraftniveau ist der Spritzer auf der gegenüberliegenden Seite (Druckseite 22MnB5). In der Versuchsreihe 1b-2 zeigt sich das gegenteilige Bild. Das Auftreten oder die Position der Spritzer scheint somit unwahrscheinlich als Ursache für die unterschiedlichen Kraftniveaus.



Bild 65
Bruchbilder

a) **1a-6-Sz** ($d_L = 5,7 \text{ mm}$)
22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (1,5 mm)

b) **1b-2-Sz** ($d_L = 7,0 \text{ mm}$)
22MnB5 (1,5 mm) – HCT600XD (1,5 mm)
(1b-2-Sz-2 vorzeitig beendet)

c) **1b-3-Sz** ($d_L = 6,5 \text{ mm}$)
22MnB5 (1,5 mm) – HCT600XD (1,5 mm)

d) **1b-5-Sz** ($d_L = 7,2 \text{ mm}$)
22MnB5 (1,5 mm) – HCT980XD (1,5 mm)

(4) Bild 65 zeigt, dass auf allen Proben des hohen Kraftniveaus Abplatzungen der Beschichtung im Bruchbild auf der 22MnB5 Zugseite auftreten. Die Abplatzung der Beschichtung ist halbkreisförmig und befindet sich an der vermuteten EWZ-Position. Dies deutet darauf hin, dass es bei den Proben, die das obere Kraftniveau aufweisen zu einer Einschnürung in der EWZ kam. Die Proben des unteren Kraftniveaus zeigen keine Hinweise auf eine Einschnürung der Erweichungszone.

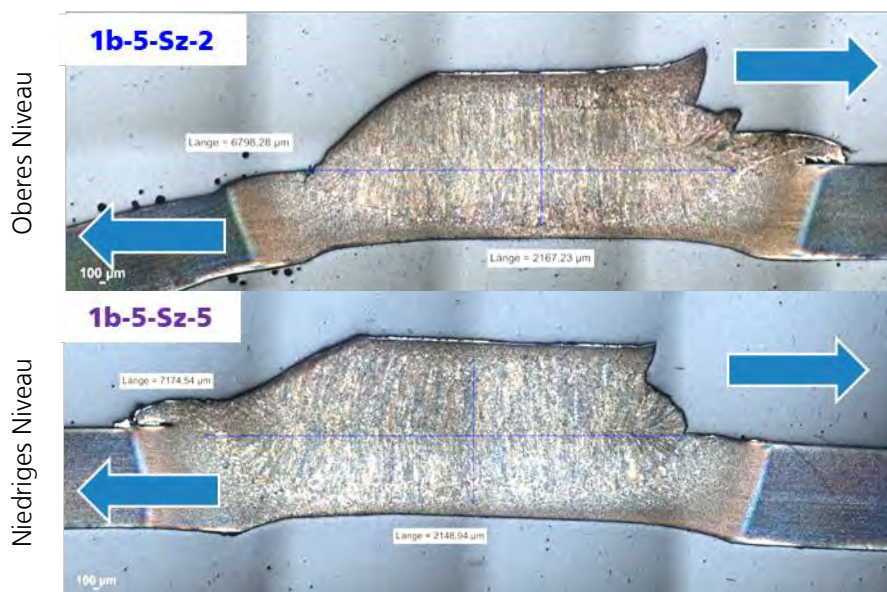


Bild 66
Schliffbilder aus Versuchsreihe
22MnB5 (1,5 mm) – HCT980XD (1,5 mm)

1b-5-Sz-2
($d_{L, \text{Schliff}} = 6,8 \text{ mm}$)

1b-5-Sz-5
($d_{L, \text{Schliff}} = 7,2 \text{ mm}$)

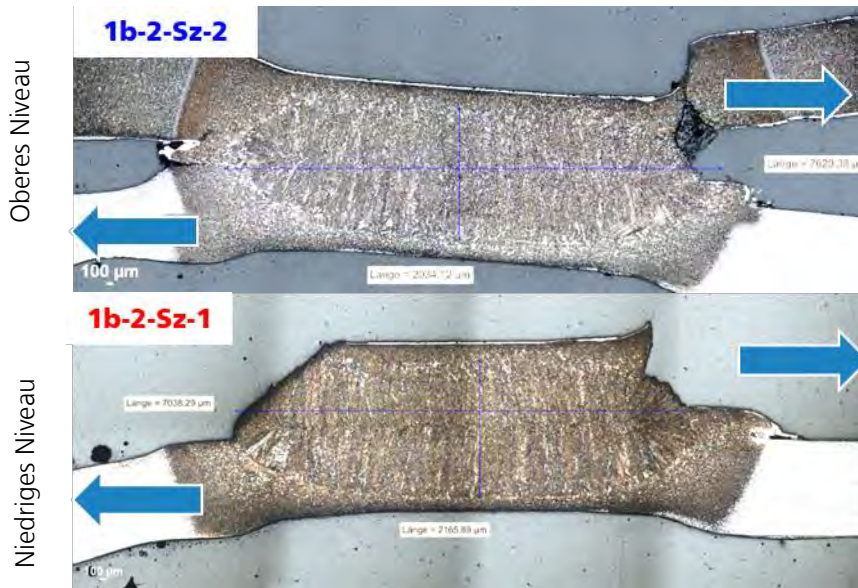


Bild 67
Schliffbilder aus Ver-
suchsreihe
22MnB5 (1,5 mm) –
HCT600XD (1,5 mm)

1b-2-Sz-2
($d_{L,Schliff} = 7,6 \text{ mm}$)

1b-2-Sz-1
($d_{L,Schliff} = 7,0 \text{ mm}$)

Der Versuch zu Probe 1b-2-Sz-2 wurde vorzeitig abgebrochen. Aufgrund des Schliffbil-
des zu Probe 1b-2-Sz-2 (Bild 68) können Rückschlüsse auf den Rissverlauf gemacht
werden. Anhand der schematischen Darstellung in Bild 68, soll der Rissverlauf in der
Fügestelle in Bezug auf den Kraft-Wegverlauf rekonstruiert werden. Zuerst kommt es
zu einer Lokalisierung der Dehnung in der Erweichungszone (Grün) im 22MnB5 Blech.
Dies führt zu einem glatten Verlauf der Kraft-Wegkurve ①. Aufgrund der Einschnü-
rung bleibt das Blech eben und die Verbindung dreht sich nicht. Der Riss entlang der
Schweißlinse entsteht schlagartig ② und es kommt zu einem halbkreisförmigen Riss ■
auf der Zugseite des 22MnB5 Blechs. Anschließend kommt es zu einem Kraftanstieg
③. Dieser Kraftanstieg kann zwei Gründe haben. Ein möglicher Grund ist, dass sich die
Verbindung jetzt dreht, da auf einer Seite der Fügestelle keine Stützfunktion mehr
vorhanden ist. Ein anderer möglicher Grund ist, dass der Butzen deformiert wird. Die Be-
lastung endet mit einem vollständigen Ausknöpfbruch ● aus dem 22MnB5 Blech.

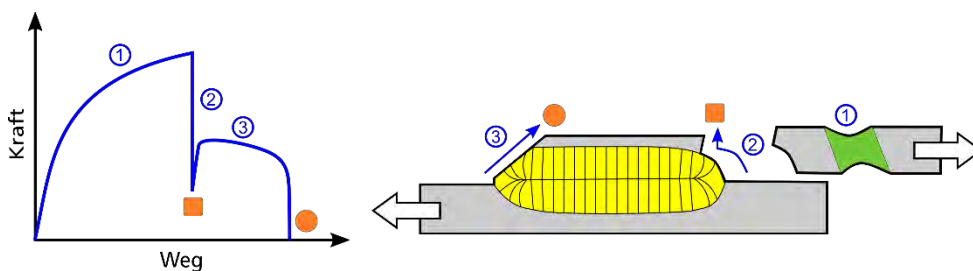


Bild 68
Schematische Darstellung
des vermuteten Rissver-
laufs mit Bezug zur Kraft-
Wegkurve

Die Proben, die das niedrige Kraftniveau aufweisen, schnüren nicht in der Erweichungs-
zone ein. Die Probe rotiert vermutlich aufgrund minimaler Unterschiede in der Probe
mehr. Dadurch werden die Risse auf der Zugseite des 22MnB5 Blechs entlang der
Schweißlinse und auf der gegenüberliegenden Druckseite des 22MnB5 Blechs zusam-
men initiiert. Die Risse verlaufen sukzessive auf beiden Seiten. Dies führt zu einem un-
ruhigen Verlauf.

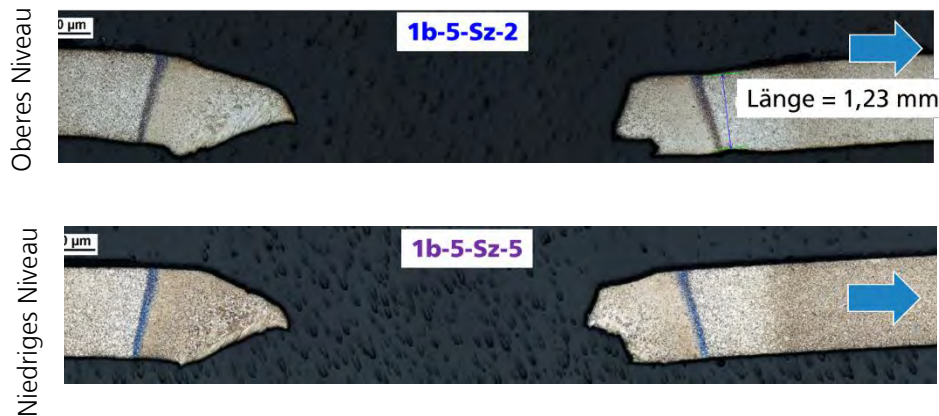


Bild 69
Schlichtbilder aus Ver-
suchsserie
22MnB5 (1,5 mm) –
HCT980XD (1,5 mm)
(oberes Blech)

1b-5-Sz-2
($d_{L,Schliff} = 6,8 \text{ mm}$)

1b-5-Sz-5
($d_{L,Schliff} = 7,2 \text{ mm}$)

Ursache (4) wird als die plausibelste Begründung angesehen. Weiterhin spricht dafür, dass die betroffenen Versuchsserien im mittleren oder oberen Schweißbereich angefertigt wurden. Dies führt zu einer stärker ausgeprägten bzw. breiteren Erweichungszone. Für zwei Proben aus Reihe 1b-5 wurden Schlichte für das obere Blech (22MnB5) der gebrochenen Proben angefertigt. Diese sind in Bild 69 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Probe, die das obere Kraftniveau aufweist, eine Einschnürung in der Erweichungszone aufweist. Für die Probe des unteren Kraftniveaus ist keine Einschnürung in der Erweichungszone zu erkennen.

4 Modellerstellung

4.1 Ansatz für ungleichartige Verbindungen

Für ungleichartige Verbindungen liegen nur wenige Datensätze vor. In diesem Projekt wurden daher zusätzliche Daten erhoben (Kapitel 3). Da die Belastungsarten getrennt voneinander betrachtet werden müssen und jede Versuchsreihe einen einzelnen Datenpunkt liefert, handelt es sich lediglich um 28 Datenpunkte. Daher soll statt einer eigenen Modellentwicklung an diesen wenigen Datenpunkten ein Verfahren überprüft werden, um Modelle für gleichartige Verbindungen auf ungleichartige Verbindungen zu übertragen. Dazu wurden die neuen Versuchsdaten mit Datensätzen aus der bestehenden Datenbank verglichen, bei denen es sich um gleichartige Verbindungen mit einem der beiden Fügepartner handelt.

4.1.1 Scherzug

Es wurde eine Verbindung mit den Fügepartnern HCT780XD (1,5 mm) und DC04 (1 mm) geprüft. In der Literatur sind korrespondierende gleichartige Verbindungen vorhanden. Gleichartige Verbindungen von HCT780XD (1,5 mm) sind in [SST+17] sowie in Datensätzen von Stahlherstellern erfasst. Eine gleichartige Verbindung von DC04 (1 mm) findet sich in [DVS2902-3]. Der Vergleich der Maximalkräfte für einen einfach überlappten Scherzug ist in Bild 70 zu sehen.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Maximalkraft der ungleichartigen Verbindung auf dem gleichen Niveau liegt wie die gleichartige Verbindung mit DC04 (1 mm). Damit entspricht die Tragfähigkeit der ungleichartigen Verbindung derjenigen Tragfähigkeit der gleichartigen Verbindung, die das niedrigere Niveau erreicht.

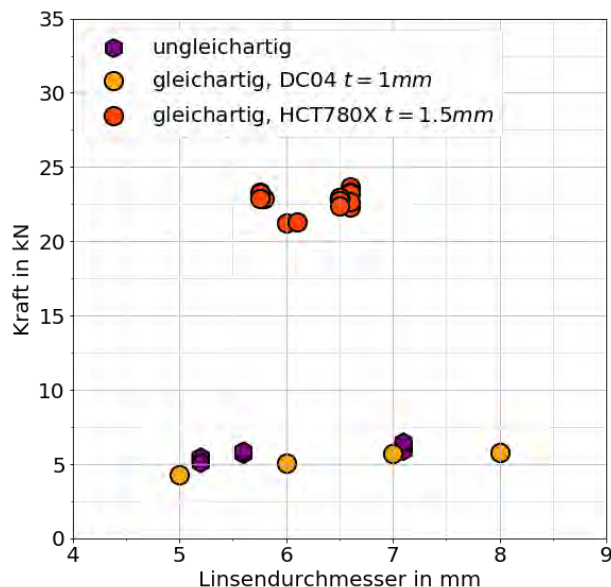


Bild 70
Scherzugproben mit Ausknöpfbruch aus DC04 (1 mm)

4.1.2 Kopfzug

Für den Kopfzugversuch konnte keine korrespondierende gleichartige Verbindung mit DC04 (1 mm) gefunden werden. Stattdessen wurde zum Vergleich eine Verbindung mit DC03 (1,2 mm) herangezogen (siehe Bild 71).

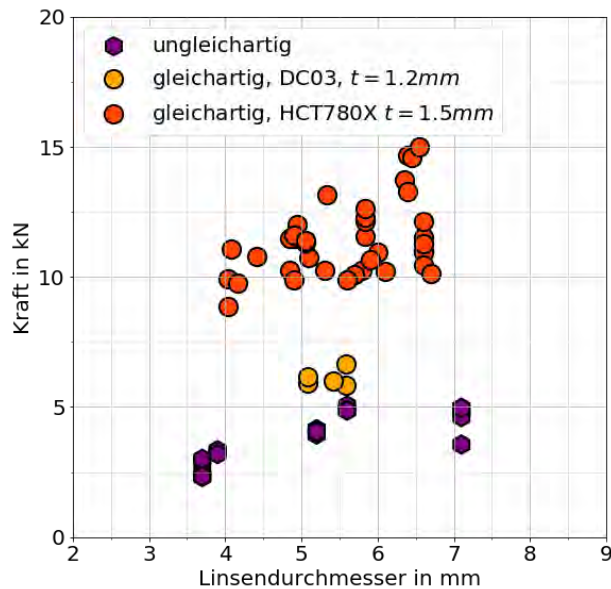


Bild 71
Kopfzugproben mit Ausknöpfbruch aus DC04 (1 mm)

Wie beim Scherzugversuch liegt die Maximalkraft auf dem Niveau der gleichartigen Verbindung mit DC03. Die gleichartige Verbindung hat ein etwas höheres Niveau, was auf die nicht exakt übereinstimmende Blechdicke und abweichenden Stahl zurückzuführen ist.

4.2 Modellerstellung mit Ridge Regression

Regressionsverfahren gehören zu den Machine Learning Verfahren aus der Kategorie des überwachten Lernens (engl. Supervised Learning). Sie dienen dazu kontinuierliche Werte vorherzusagen. Die Eingangsgrößen werden auch als Merkmale bezeichnet. Diese werden mit Gewichtungen multipliziert, um eine Zielgröße zu berechnen. Da es sich um ein Regressionsverfahren handelt, kann das Modell in einer Parameterfunktion ausgedrückt werden.

Dabei kommen mehrere Methoden zur Anwendung, die ein Machine Learning Verfahren ausmachen und es von einer konventionellen Polynom-Anpassung mit Least Square Verfahren unterscheiden.

Im Kern ist es entscheidend ein Modell zu bestimmen, welches das zu beschreibende Phänomen möglichst genau vorhersagt. Die Datensätze, die zur Bestimmung des Modells zur Verfügung stehen werden auch als Beobachtungen bezeichnet. Diese im Rahmen von Versuchen erhobenen Beobachtungen sind naturgemäß mit Fehlern behaftet. Um trotzdem alle Beobachtungen mit einer möglichst kleinen Abweichung abzubilden, kann ein hoher Polynomgrad gewählt werden. Abgesehen von der erhöhten Komplexität führt dies in erster Linie zu einem Polynom, welches viele lokale Minima und Maxima aufweist. Das Polynom stellt für die vorhandenen Messdaten eine gute Anpassung

dar, bildet die eigentlichen physikalischen Zusammenhänge aber nicht ab. Dies wird offensichtlich sobald neue Datenpunkte zur Verfügung stehen. Man spricht von einer Überanpassung. Das Modell zeigt eine zu hohe Varianz auf und generalisiert nicht. Das andere Extrem ist eine Unteranpassung. Diese entsteht, wenn die Komplexität zu niedrig gewählt wurde. Dann hat das Modell ein zu hohes Bias und generalisiert auch hier nicht. Zur Findung eines möglichst ausgeglichenen Modells werden Kreuzvalidierung und Regularisierung verwendet. Mit der Kreuzvalidierung wird sichergestellt, dass das Modell nicht zu stark von den zur Verfügung stehenden Beobachtungen abhängt. Die Regularisierung dämpft die Komplexität ein, indem große Gewichte abgeflacht werden. Ridge Regression und LASSO Regression gehören zu den am weitesten verbreitetsten Regularisierungsmethoden für die lineare Regression. Das LASSO Verfahren eignet sich, wenn wenig Hintergrundwissen vorhanden ist, welche Eingangsgrößen die Zielgröße beeinflussen. Es dient zur Auswahl der Merkmale. Hier ist aus dem Vorgängerprojekt [SSC14] bekannt, mit welchen Merkmalen die Maximalkraft der Verbindung am besten beschrieben werden kann. In diesem Projekt wird zur Regularisierung das Ridge Regression Verfahren verwendet.

4.2.1 Auswahl der Merkmale

Die Eingangsgrößen, die ein Modell zur Vorhersage einer Zielgröße verwendet, werden als Merkmale bezeichnet. In [SSC14] wurden die drei Merkmale Blechdicke, Schweißlinsendurchmesser und Zugfestigkeit als die entscheidenden unabhängigen Merkmale identifiziert, die am besten geeignet sind, um die Tragfähigkeit einer Schweißverbindung vorherzusagen. Dabei wurden für einzelne Stahlfamilien (mikrolegierte Stähle, Weichstähle, Tripstähle, Complexphasenstähle, Dualphasenstähle) eigene Modelle entwickelt. In Bild 72 ist die Tragfähigkeit von gleichartigen Scherzugverbindungen dargestellt. Gleichartig beschreibt in diesem Zusammenhang, dass beide Partner der Verbindung die gleichen Parameter (Blechdicke, Material) aufweisen.

Es handelt sich um Ergebnisse von Datensätzen zu drei Stahlfamilien mit gleicher Zugfestigkeit ($R_m = 800 \text{ MPa}$). Die roten Rechtecke sind Ergebnisse aus gleichartigen Verbindungen mit Complexphasenstahl, die blauen Kreise sind Ergebnisse aus gleichartigen Verbindungen mit Dualphasenstahl und die orangenen Rauten sind Ergebnisse aus gleichartigen Verbindungen mit Tripstahl. Für Blechdicke 1,0 mm liegen alle Ergebnisse in einem Streuband. Für Blechdicke 1,5 mm liegen deutlich mehr Ergebnisse für Tripstahl vor als für die anderen beiden Stahlsorten. Die Ergebnisse des Complexphasenstahls liegen etwas unterhalb der Ergebnisse der Tripstahl Daten. Die Ergebnisse des Dualphasenstahls streuen sehr stark. Es ist keine deutliche Abgrenzung der drei Stahlsorten zu erkennen.

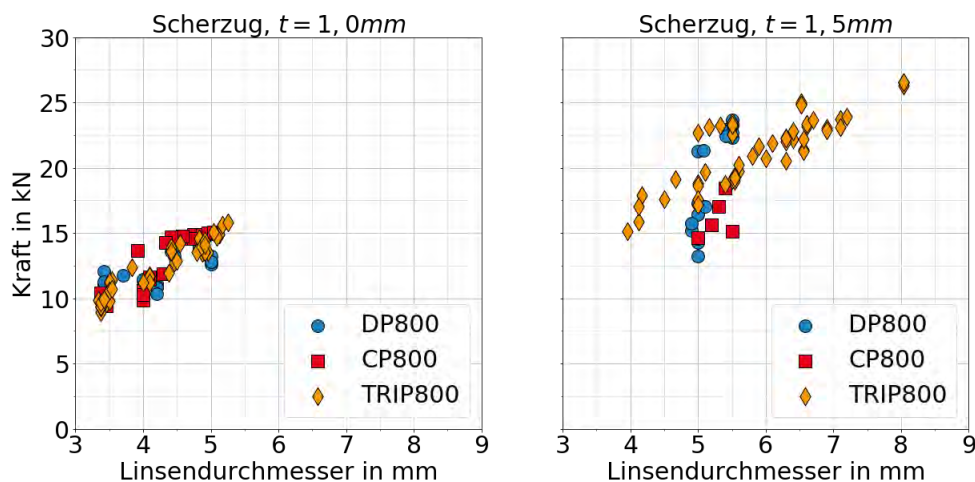


Bild 72
Gleichartige Scherzugproben mit $R_m = 800 \text{ MPa}$ und $t = 1,0 \text{ mm}$ (links) bzw. $t = 1,5 \text{ mm}$ (rechts) für die Stahlfamilien Dualphasenstahl (Kreis Blau), Complexphasenstahl (Rechteck Rot), Tripstahl (Raute Orange)

In Bild 73 (links) ist ein Vergleich der Stahlfamilie Weichstahl (DC04) zu mikrolegierter Stahl (H220LA) zu sehen. Die Blechdicke ist für alle Verbindungen im Diagramm links $t = 1,0 \text{ mm}$. Die Zugfestigkeiten waren in der Datenbank nicht angegeben und wurden durch Literaturwerte ergänzt. Für DC04 wurde der Wert $R_m = 290 \text{ MPa}$ angegeben, für H220LA der Wert $R_m = 340 \text{ MPa}$. Die Maximalkräfte für gleichartige Verbindungen aus H220LA (orangene Rechtecke) liegen etwas höher als die Ergebnisse für DC04 (grüne Kreise). Der Unterschied ist mit der tendenziell höheren Zugfestigkeit des mikrolegierten Stahls zu erklären.

In Bild 73 (rechts) ist ein weiterer Vergleich zwischen den Stahlfamilien Weichstahl (DX56) zu mikrolegierter Stahl (H260LA) zu sehen. Hier beträgt die Blechdicke $t = 1,5 \text{ mm}$. Die Zugfestigkeiten sind auch hier aus Literaturwerten ergänzt und betragen $R_m = 320 \text{ MPa}$ für DX56 und $R_m = 390$ für H260LA. Die höheren Maximalkräfte für die gleichartigen Verbindungen aus H260LA (orangene Rechtecke) im Vergleich zu DX56 (grüne Kreise) sind auf die leicht unterschiedlichen Zugfestigkeiten zurückzuführen.

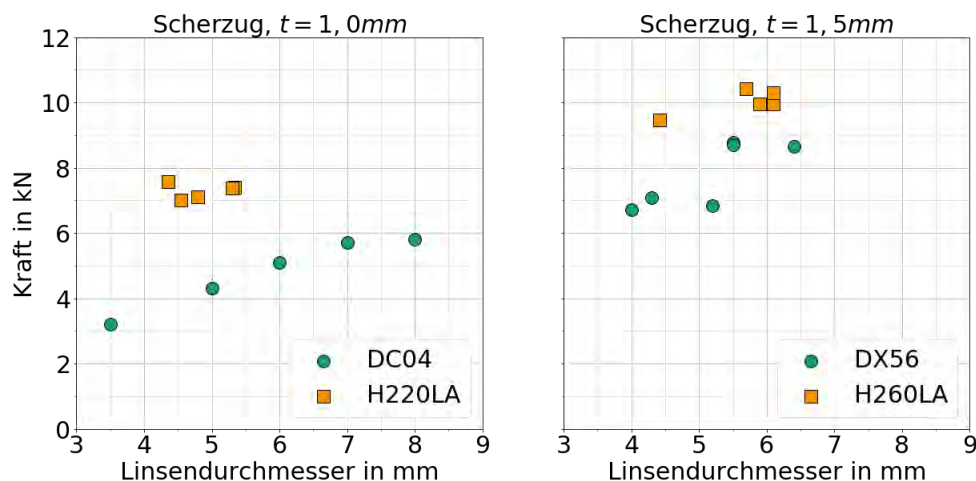


Bild 73
Gleichartige Scherzugproben mit $t = 1,0 \text{ mm}$ und $t = 1,5 \text{ mm}$ und ähnlichen Zugfestigkeiten für die Stahlfamilien Weichstahl (Kreis grün), mikrolegierter Stahl (Rechteck Orange)

Aufgrund der beschriebenen Ergebnisse werden in diesem Projekt keine Stahlsorten unterschieden. Die Zugfestigkeit wird als beschreibendes Merkmal verwendet.

4.2.2 Lineare Regressionsverfahren

Eine multiple lineare Regression kann mit Formel (1) beschrieben werden. Dabei ist y die Zielgröße bzw. Modellvorhersage, \mathbf{w} sind die Gewichtungen und \mathbf{x} sind die Merkmale. Die Länge des Vektors \mathbf{x} entspricht der Anzahl der Merkmale plus einer Konstanten. Es handelt sich um einen linearen Zusammenhang zwischen Merkmalen und der Zielgröße. Besteht der Vektor \mathbf{x} nur aus einem einzigen Merkmal und der Konstanten spricht man von einer einfachen linearen Regression. Wird mehr als ein Merkmal verwendet, spricht man von einer multiplen linearen Regression.

Oft werden nichtlineare Zusammenhänge gesucht, die in einem Regressionsmodell beschrieben werden sollen. Hierzu wird die Anzahl der Merkmale erhöht. Merkmale, die

nichtlinear eingehen sollen, werden entsprechend aufbereitet, mit einer zusätzlichen eigenen Gewichtung multipliziert und hinzuaddiert.

$$y = \mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x} \quad \text{mit } \mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_0 \\ w_1 \\ \vdots \\ w_D \end{bmatrix} \quad \text{und } \mathbf{x} = \begin{bmatrix} 1 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_D \end{bmatrix} \quad (1)$$

Für das in diesem Projekt gesuchte Modell werden die drei Merkmale d_L , t und R_m verwendet. Um einen quadratischen Einfluss aller Terme zu berücksichtigen, hätte der Vektor \mathbf{x} daher die Länge sieben. Die einzelnen Einträge in \mathbf{x} wären dann $[1, d_L, d_L^2, t, t^2, R_m, R_m^2]^T = [1, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T$. Auch bei der polynomialen Regression wird zur Optimierung der Hyperparameter das Minimum einer Kostenfunktion $\varepsilon(\mathbf{w})$ gesucht.

Das polynomiale Modell kann so weiterhin mit Formel (1) beschrieben werden. Es kann also weiterhin als lineare Funktion beschrieben werden. Bei der polynomialen Regression handelt es sich um einen Spezialfall der linearen Regression.

Zur Umsetzung der Modellerstellung wird die Python-Bibliothek scikit-learn verwendet. Dabei handelt es sich um eine freie Python-Bibliothek, die viele gängige Algorithmen des maschinellen Lernens bereitstellt [Sci11]. Es sind verschiedene Regressionsalgorithmen auf dem Konzept der linearen Regression implementiert.

4.2.3 Hyperparameter und Kreuzvalidierung

Um das Regressionsmodell zu erstellen, müssen zwei Parameter bestimmt werden. Der Regularisierungsfaktor λ und der Polynomgrad n . Mit einem hohen Polynomgrad können komplexere Zusammenhänge der Merkmale im Modell wiedergegeben werden, gleichzeitig führt ein hoher Polynomgrad jedoch schnell zu einer Überanpassung. Eine ähnliche Problematik betrifft die Gewichtungen des Polynoms. Wenn die Gewichte sehr hoch sind kommt es zu einer Überanpassung. Das Ziel bei der Bestimmung des Polynomgrads und der Gewichtungen ist ein Gleichgewicht zu finden und das Regressionsmodell komplex genug aufzubauen, damit es das Phänomen gut wiedergibt, aber nicht so komplex, dass es nur die verwendeten Trainingsdaten widerspiegelt (siehe Bild 74).

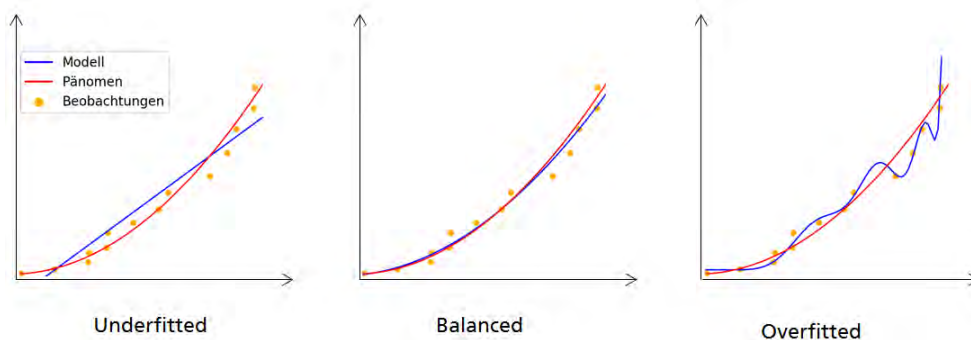


Bild 74
Underfitting und Overfitting von Regressionsmodellen [Ba20]

Das Regressionsverfahren Ridge Regression hilft bei der Einschränkung der Gewichte. Es bestraft sehr hohe Gewichte, um so Überschwinger zu vermeiden. So wird verhindert, dass einzelne Terme stark überwiegen und das Modell dominieren. Es wird ein Bestrafungsterm eingeführt, der zur Residuenquadratsumme (RSS) hinzuaddiert wird.

$$\varepsilon(\mathbf{w})_{\text{Ridge}} = \sum_{i=1}^n (y^{(i)} - \hat{y}^{(i)})^2 + \lambda \sum_{j=1}^m w_j^2 \quad (2)$$

Die Kostenfunktion $\varepsilon(\mathbf{w})_{\text{Ridge}}$ setzt sich aus einem Term der Residuenquadratsumme und einem Regularisierungsterm zusammen. Dabei ist $y^{(i)}$ der wahre Wert und $\hat{y}^{(i)}$ der vom Modell vorhergesagte Wert einer Eingangsvariable $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{1 \times n}$. Der Regularisierungsfaktor λ wird mit der Summe der quadrierten Gewichte w_j multipliziert. Der zweite Term steigt, wenn die Gewichte des Modells hoch sind. Zur Minimierung der Kostenfunktion müssen die Gewichtungen daher klein sein, was zu einer kleineren Varianz des Modells führt. Zusätzlich kann durch den Regularisierungsfaktor λ der Einfluss des Terms gesteuert werden. Je größer der Regularisierungsfaktor λ , desto größer ist der Einfluss der Gewichtungen auf die Kostenfunktion.

Die Datenpunkte werden in Testdaten und Trainingsdaten aufgeteilt. Das Modell wird nur mit den Trainingsdaten angepasst bzw. trainiert. Die Testdaten dienen zur Qualitätsbeurteilung. Da die Testdaten nicht zur Modellerstellung verwendet wurden, wird eine gute Allgemeingültigkeit gezeigt, wenn das Modell die Testdaten gut vorhersagt. Man spricht dann von einer guten Generalisierung des Modells. Der Fehler zur Beurteilung der Qualität wird in der Regel mit der mittleren quadratischen Abweichung (*MSE*, engl. Mean Squared Error) beschrieben.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y^{(i)} - \hat{y}^{(i)})^2 \quad (3)$$

Je kleiner der MSE ist, desto kleiner ist die Abweichung zwischen Vorhersage und Testdaten, das heißt desto besser ist die Generalisierung. Der Nachteil dieses Gütemaßes ist, dass es nicht einheitenlos ist. Es eignet sich, um Modelle, die den gleichen Datensatz verwenden, miteinander zu vergleichen. Dieses Maß wird auch oft in iterativen Lösungsverfahren als Fehlerfunktion verwendet. Da es auf absoluten Werten basiert, eignet es sich nur bedingt zur allgemeinen Interpretation einer Modellgüte. Daher wird hier ein anderes Maß zur Qualitätsbeurteilung verwendet. Das Bestimmtheitsmaß R^2 ist die standardisierte Variante der mittleren quadratischen Abweichung und wird durch Gleichung (4) beschrieben. Hier sind $y^{(i)}$ der wahre Wert, $\hat{y}^{(i)}$ der vom Modell vorhergesagte Wert einer Zielvariable, sowie $\bar{y}^{(i)}$ der arithmetische Mittelwert der vorhergesagten Zielvariablen. Das Bestimmtheitsmaß ist einheitenlos. Umso näher R^2 am Wert 1 ist, desto besser stimmt die Modellvorhersage mit den wahren Werten überein.

$$R^2 = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y^{(i)} - \hat{y}^{(i)})^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y^{(i)} - \bar{y}^{(i)})^2} \quad (4)$$

Zur Bestimmung des Regularisierungsfaktors λ und des Polynomgrads n wird eine Kreuzvalidierung verwendet. Der Polynomgrad sollte zwischen 1 und 10 liegen, der Regularisierungsfaktor zwischen 10^{-6} und 1. Als Polynomgrad werden nur ganze Zahlen zugelassen, d.h. es sind insgesamt 10 Werte für den Polynomgrad möglich. Als Regularisierungsfaktor wird der genannte Bereich auf einer logarithmischen Skala äquidistant in 60 Werte aufgeteilt. Es werden alle möglichen Kombinationen dieser beiden Parameter gebildet. Dadurch ergibt sich mit $H = \lambda \times n$ ein Raster mit 600 Hyperparameterkombinationen. Diese Hyperparameterkombinationen sollen mittels Kreuzvalidierung bewertet werden, um die optimale Kombination auszuwählen.

Die Aufteilung der Trainingsdaten erfolgt durch eine 5-fach-Kreuzvalidierung. Dabei werden die Trainingsdaten, in $k=5$ Teilmengen (T_1 bis T_5) aufgeteilt. Die Daten werden zufällig den fünf Teilmengen zugeordnet. Es werden fünf Iterationen durchgeführt. In jeder Iteration werden vier der Teilmengen für das Training des Modells verwendet. Die fünfte Teilmenge dient zur Validierung des erstellten Modells. So wird mit fünf unterschiedlichen Trainingsmengen ein Modell erstellt und mit der dazugehörigen Validierungsmenge bewertet, indem das Bestimmtheitsmaß R^2_i berechnet wird. Aus den fünf Werten R^2_i wird ein Durchschnittswert R^2_{mean} berechnet. Dieses Vorgehen wird für jede Hyperparameterkombination wiederholt. Zuletzt wird die optimale Hyperparameterkombination, für die R^2_{mean} den größten Wert erreicht, ausgewählt.

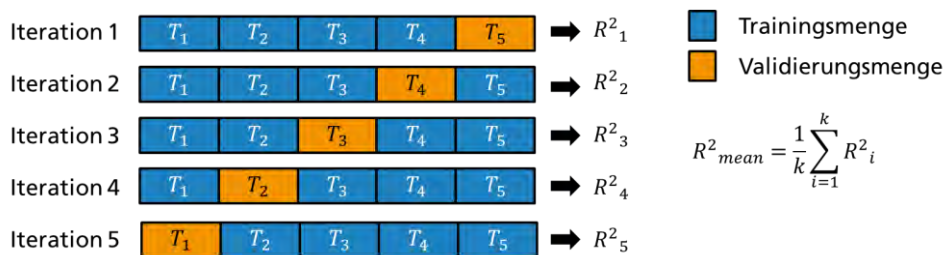


Bild 75
Kreuzvalidierung am Beispiel von $k = 5$

In Bild 76 ist die 5-fache Kreuzvalidierung dargestellt. Der Datensatz wird in fünf Teilmengen aufgeteilt. Die Trainingsmenge ist in Blau dargestellt, die Validierungsmenge in Orange. In jeder Iteration wird eine andere Teilmenge zur Leistungsbewertung verwendet.

4.2.4 Programmablauf

Für die Bestimmung der Hyperparameter und der Gewichte für das Regressionsmodell wird der Programmablauf in Bild 76 verwendet. Zuerst werden die Daten auf einen Trainingsdatensatz und einen Testdatensatz aufgeteilt. Diese Aufteilung wird mit der Funktion `train_test_split` durchgeführt. Die Aufteilung wird zufällig durchgeführt. Ein `random_seed` setzt die zufällige Aufteilung zur Nachvollziehbarkeit fest.

Es werden künstliche Randwerte generiert, die dazu dienen sollen, für jedes Merkmal eine feste Grenze festlegen zu können. Für den unteren Rand sind dies Kombinationen der Eingangsgrößen, für die die Tragfähigkeit gleich Null ist. So ist ersichtlich, dass sobald eine der Eingangsgrößen (d_L, R_m, t) den Wert Null hat auch die Tragfähigkeit den Wert Null haben muss. In Kapitel 4.4 wird näher auf die Erzeugung der künstlichen Randwerte eingegangen. Die künstlichen Randwerte werden nur den Trainingsdaten hinzugefügt. So wird sichergestellt, dass bei der Berechnung des Bestimmtheitsmaß anhand der Testdaten nur die Vorhersagegüte für „echte“ Daten bewertet wird.

Für die jeweiligen Belastungsarten konnte festgestellt werden, dass der Datenraum sehr unausgeglichen abgedeckt wird. So gibt es zum Beispiel insbesondere für 22MnB5 eine Häufung der Datensätze. Andere Bereiche, z.B. zwischen HCT600XD und 22MnB5 sind wiederum sehr spärlich belegt. Um einen ausgeglichenen Trainingsdatensatz zu erhalten, wurde daher ein Rastermittlungsverfahren entwickelt. Es wird in 4.3 erläutert.

Als nächstes werden die Merkmale X_{train} skaliert. Dies soll verhindern, dass Merkmale mit großen Absolutwerten stärker gewichtet und Merkmale mit kleinen Absolutwerten

weniger gewichtet werden. Die Zugfestigkeit in MPa und Blechdicke und Linsendurchmesser bewegen sich auf sehr unterschiedlichen Skalen, so dass es ohne Skalierung zu einer starken Verzerrung kommen kann. Eine Normalisierung verhindert diese Verzerrung. In scikit-learn stehen dazu unterschiedliche Algorithmen zu Verfügung. Hier wird der Algorithmus *MinMaxScaler* verwendet. Dieser Algorithmus wurde dem Standard-Algorithmus *StandardScaler* vorgezogen, da die Datensätze nicht normalverteilt im Datenraum liegen. Da *StandardScaler* auf der Berechnung des Mittelwerts und der Standardabweichung beruht, führen ungleichmäßig verteilte Datensätze zu einer Verzerrung.

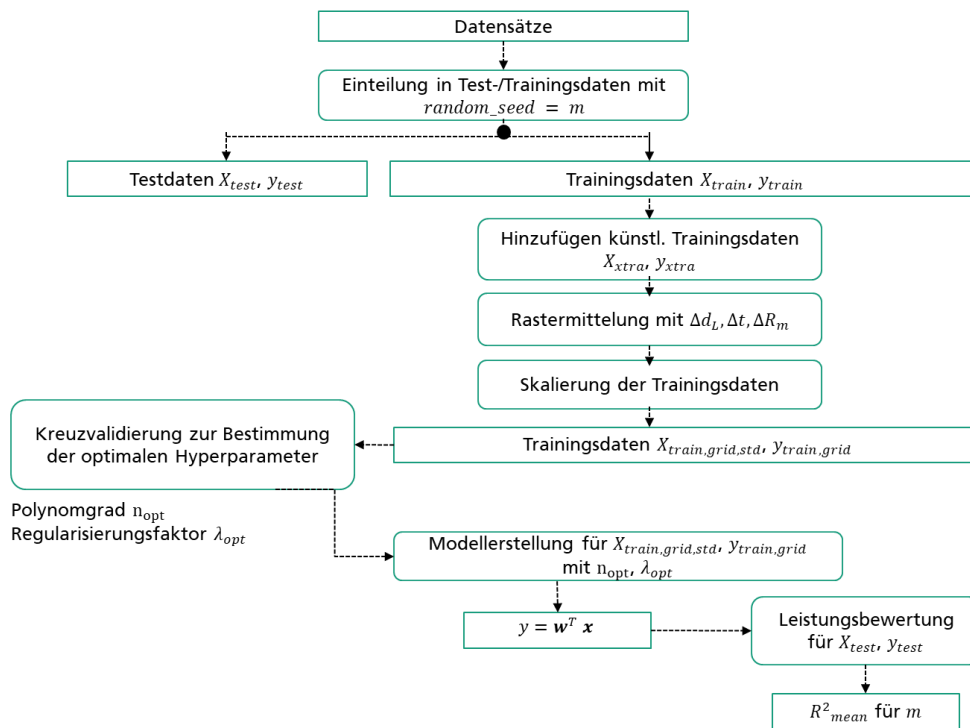


Bild 76
Programmablauf zur Ermittlung des Regressionsmodells

Die Trainingsdaten sind nun mit künstlichen Randdaten ergänzt, über ein Raster gemittelt und zusätzlich skaliert worden. Nun werden die optimalen Hyperparameter gesucht. Dazu wird das Kreuzvalidierungsverfahren *kfold* verwendet mit fünf Teilungen. Mit den ermittelten Parametern für den Polynomgrad und den Regularisierungsfaktor wird anschließend das Modell mit den ursprünglichen Trainingsdaten erstellt. Hier werden die Gewichtungen für das Modell ermittelt. Für das fertige Modell wird das Bestimmtheitsmaß zur Bewertung der Vorhersagegüte anhand der Testdaten berechnet.

4.3 Datenbereinigung

Die Datensätze für die Modellerstellung wurden im Wesentlichen von den Projektpartnern bereitgestellt. Hinzu kommen Daten aus abgeschlossenen öffentlichen Projekten und der Literatur.

Für die Modellerstellung wurden nur quasistatische Versuche verwendet. Als quasistatisch gelten hierbei alle Versuche mit einer Prüfgeschwindigkeit von $v \leq 200 \text{ mm/s}$. Weiterhin wurden nur gleichartige Verbindungen in Blechdicke und Material verwendet. Zusätzlich wurde überprüft, ob das obere und untere Blech die gleiche Zugfestigkeit besitzen, da beispielsweise pressgehärtete Stähle mit der gleichen Materialbezeichnung in unterschiedlichen Festigkeiten vorliegen können. Viele Datensätze sind unvollständig. So war insbesondere der Linsendurchmesser nicht immer angegeben, da dieser

aufwendig anhand von Schlibbildern ermittelt werden muss. Um trotzdem eine möglichst große Datenbasis zu erhalten, wurde versucht fehlende Angaben sinnvoll zu ergänzen. Für Datensätze, für die kein Linsendurchmesser angegeben war, wurde in der Regel stattdessen der Punktdurchmesser angegeben. Für die Ermittlung des Punktdurchmessers liegen Messrichtlinien vor [DVS Merkblatt – 2902-3]. Auf Basis dieser Richtlinie, lässt sich ableiten, wie sich der Linsendurchmesser aus dem Punktdurchmesser abschätzen lässt. Fehlende Linsendurchmesser wurden wie folgt ergänzt:

- Für die Bruchart Ausknöpfbuch bei gleichzeitiger Zugfestigkeit des Materials kleiner 1000 MPa wird ein Linsendurchmesser angenommen, der 20% kleiner ist als der Punktdurchmesser.
- Für die Bruchart Ausknöpfbuch bei gleichzeitiger Zugfestigkeit des Materials größer 1000 MPa wird der Linsendurchmesser gleich dem Punktdurchmesser gesetzt.
- Für alle anderen Brucharten wird der Linsendurchmesser gleich dem Punktdurchmesser gesetzt unabhängig von der Zugfestigkeit.

Die Ergänzung ist damit bis auf die Unterscheidung nach Zugfestigkeit für Datensätze mit Ausknöpfbüchen identisch zum Vorgängerprojekt [SSC14]. Die Unterscheidung in der Zugfestigkeit für Ausknöpfbüche ist damit begründet, dass für Punktschweißverbindungen mit Blechen der Zugfestigkeit größer 1000 MPa, der Ausknöpfbuch in der Regel entlang der Schweißlinse läuft. Für duktilere Stähle mit Zugfestigkeiten kleiner 1000 MPa läuft der Riss entlang der Grenze zwischen Wärmeeinflusszone und Grundwerkstoff. Der ausgemessene Butzen ist dann ca. 20 % größer als der Linsendurchmesser, da der Butzen die Wärmeeinflusszone beinhaltet (siehe Bild 77).

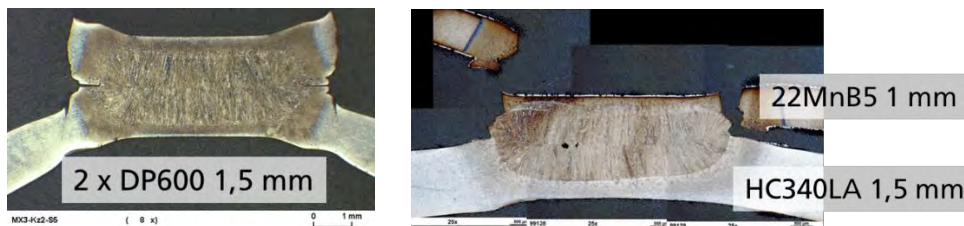


Bild 77
Ausknöpfbuch aus einem Stahl mit mittlere Zugfestigkeit (links [Som09]) und Ausknöpfbuch aus einem Stahl mit hoher Zugfestigkeit (rechts [GSB+12])

Es wird davon ausgegangen, dass Datensätze für die keine Geschwindigkeit angegeben wurde, quasistatisch geführt wurden. Daher wurden alle Datensätze ohne Geschwindigkeitsangabe verwendet. Im Falle einer fehlenden Angabe der Zugfestigkeit wurden Literaturwerte bzw. Werte aus Werkstoffdatenblättern eingesetzt. Die Literaturangaben betragen Bandbreiten von ca. 90 MPa. Es wurde in der Regel der Mittelwert verwendet. Welche Zugfestigkeit das verwendete Blech im Experiment hatte, kann nicht rekonstruiert werden. Es ist möglich, dass es sich im unteren Bereich oder oberen Bereich bewegt. Hierdurch sind Ungenauigkeiten zu erwarten.

In der Datenbank ist zu erkennen, dass bestimmte Stähle von besonders großer Bedeutung für die Automobilindustrie sind und daher vermehrt untersucht wurden, was zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Datensätze geführt hat. Ohne entsprechende Maßnahmen würden diese Stähle mehr Gewicht bei der Regression erhalten, also stärker berücksichtigt werden. Dadurch würde die Qualität der Vorhersage für Bereiche, in denen wenige Datensätze vorliegen sinken. Um diesem Problem entgegenzutreten, wurde ein Raster über den Datenraum gelegt. Innerhalb jeder Zelle dieses Rasters werden die Daten gemittelt. Der neue Datenpunkt $P(\bar{d}_L, \bar{R}_m, \bar{t}, \bar{F}_{max})$ der Rasterzelle wird aus dem arithmetischen Mittelwert der einzelnen Größen berechnet. Bild 78 zeigt wie sich die Anwendung dieses Verfahrens auf den Datenraum auswirkt.

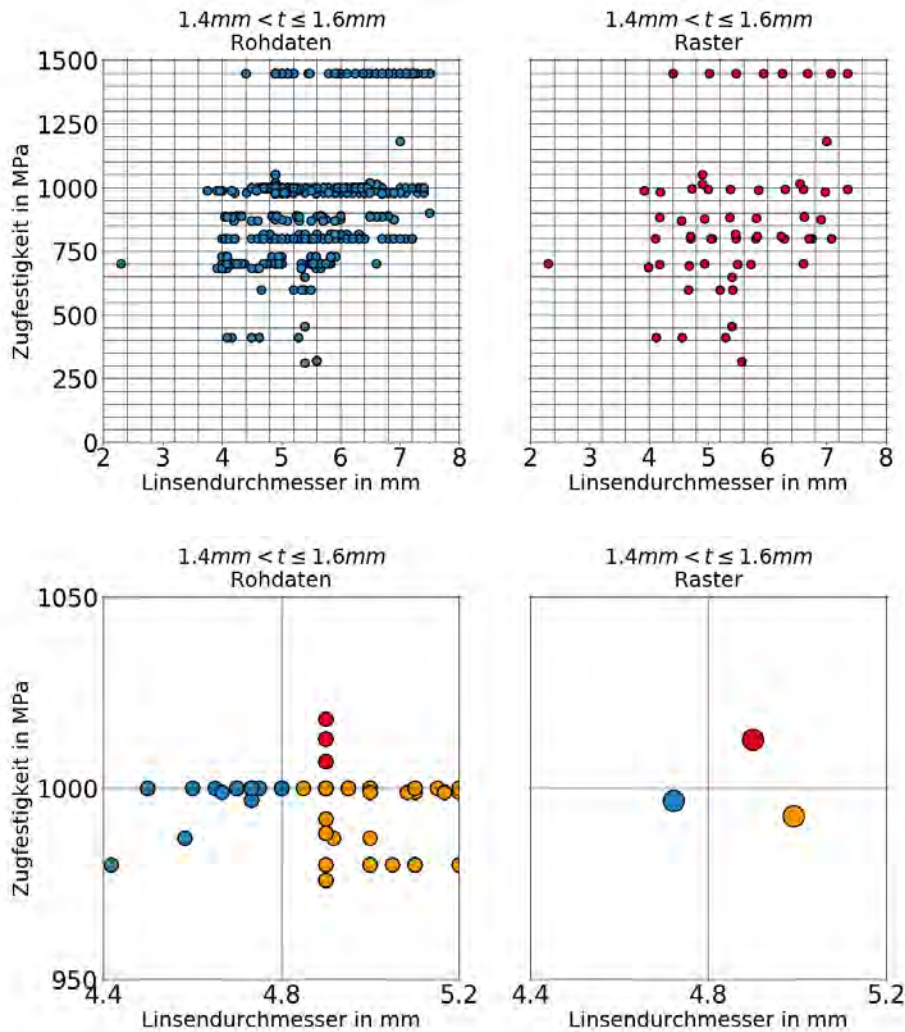


Bild 78
Mittlung der Datensätze über ein vorgegebenes Raster am Beispiel der Kopfzugdaten mit den Schrittweiten $\Delta d_L = 0.4\text{ mm}$, $\Delta t = 0.2\text{ mm}$, $\Delta R_m = 50\text{ MPa}$

Über dieses Vorgehen werden dicht besiedelte Bereiche ausgedünnt und somit gleich gewichtet wie dünn besiedelte Bereiche. Dünn besiedelte Zellen behalten ihre Werte. Falls in einer Zelle keine Werte vorhanden sind, bleiben diese Zellen leer. Die Datensätze werden folgendermaßen den Rasterzellen zugeordnet. Für jede Rasterzelle wird eine untere und obere Grenze pro Merkmal festgelegt. Es werden alle Datensätze in einer Zelle gemittelt die größer sind als die untere Grenze und kleiner oder gleich der oberen Grenze. In Bild 78 ist zu erkennen wie alle Werte mit der Zugfestigkeit $950\text{ MPa} < R_m \leq 1000\text{ MPa}$ und Linsendurchmesser $4,4\text{ mm} < d_L \leq 4,8\text{ mm}$ der Rasterzelle links unten zugeordnet werden.

4.4 Künstliche Randwerte

Regressionsverfahren können in der Regel nur innerhalb des Trainingsdatenbereichs verlässliche Vorhersagen treffen. Außerhalb des betrachteten Datenraums treten Randeffekte auf, bei denen es zu starken Überschwingern und damit zu schlechten Vorhersagen kommt. Nicht für jede Zugfestigkeit ist eine große Bandbreite an Linsendurchmessern untersucht worden. Gleiches gilt für die Blechdicke. Um Modelle zu entwickeln deren Gültigkeitsbereich für jedes Merkmal unabhängig von den anderen Merkmalen nur eine obere und eine untere Grenze besitzt, wurde zum einen künstliche Werte für die Untergrenze eingeführt und soweit sinnvoll künstliche Werte für eine Obergrenze. Der angestrebte Gültigkeitsbereichs liegt bei $200 \text{ MPa} < R_m \leq 1500 \text{ MPa}$, $0,5 \text{ mm} < t \leq 2 \text{ mm}$ und $3 \text{ mm} < d_L \leq 8 \text{ mm}$. Die künstlichen Datensätze werden den Trainingsdaten zugeordnet, so dass die spätere Leistungsbewertung bzw. die Berechnung des Bestimmtheitsmaß nur an echten Daten durchgeführt wird.

4.4.1 Künstliche Werte für die Untergrenze

Die Tragfähigkeit eines Schweißpunkts soll wie bereits erläutert als Funktion von Blechdicke t , Linsendurchmesser d_L und Zugfestigkeit des Materials R_m verwendet werden. Wenn mindestens einer dieser Parameter 0 beträgt, ist auch die Tragfähigkeit $F_{max} = 0 \text{ kN}$. Um diese Information in das Modell einfließen zu lassen, wurden künstliche Werte erzeugt. Hierzu werden künstliche Werte erzeugt, für welche eine Tragfähigkeit von $F_{max} = 0 \text{ kN}$ erwartet wird. Es wurde das Mengenprodukt $T \times RM \times DL$ aus den Mengen $T = \{0, 1, 2, 3, 4\}$ und $RM = \{0, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600\}$ und $DL = \{0, 2, 4, 6, 8, 10\}$ gebildet. Anschließend wurden nur solch Datenpunkte erhalten, für die mindestens eine Komponente bei 0 liegt. So ergeben sich 110 künstliche Werte für den unteren Rand.

4.4.2 Ermittlung einer Obergrenze für Scherzugversuche

Anhand von FE-Detailsimulationen kann gezeigt werden, dass es eine natürliche Obergrenze für die Versagenskraft von WPS-Verbindungen unter Scherung gibt. Insbesondere wird bei einem festen Linsendurchmesser bei steigender Blechdicke eine Sättigung erreicht. Es wird dann keine weitere Erhöhung der Tragfähigkeit durch Steigerung der Blechdicke erreicht.

Zur Überprüfung dieses Effekts wurden Detailsimulationen mit gleichartigen Verbindungen aus HCT600XD durchgeführt. Es wurde das in Bild 79 gezeigte Modell verwendet. Um Rechenzeit einzusparen wurde mit einem halben Modell gerechnet, indem die Symmetrie ausgenutzt wurde. Im Bereich um die Schweißlinse wurden Elemente mit einer Kantenlänge von 0,1 mm verwendet. Die Elemente sind vom Typ C3D8R. Dabei handelt es sich um Volumenelemente mit 8 Knoten und reduzierter Integration (1 Integrationspunkt). Als Solver wurde ABAQUS/Explicit verwendet.

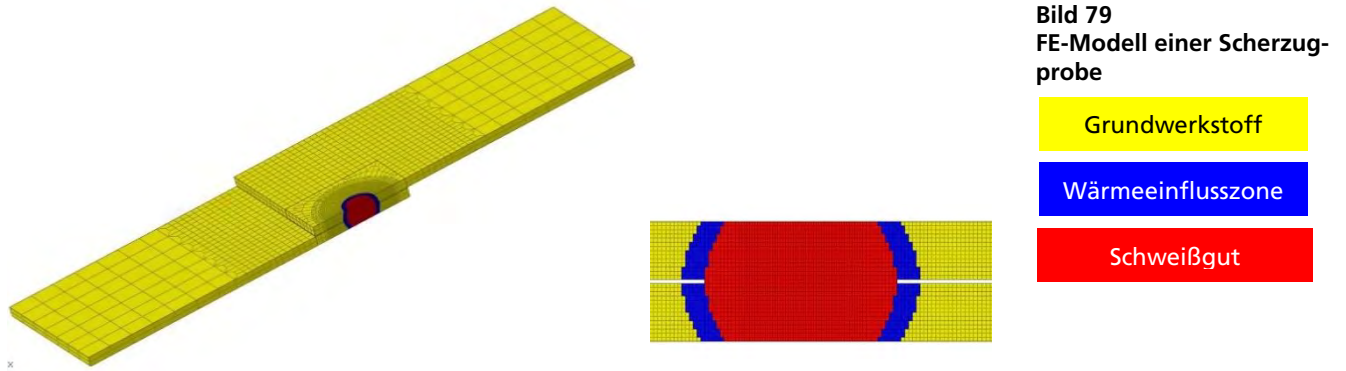


Bild 79
FE-Modell einer Scherzugprobe

Grundwerkstoff

Wärmeeinflusszone

Schweißgut

Bei dem verwendeten Materialmodell handelt es sich um ein mikromechanisches Modell welches für HCT600XD in [Som09] angepasst wurde. Das Gefüge um die Füge-
stelle wurde in die drei Materialzonen Grundwerkstoff, Wärmeeinflusszone und
Schweißgut eingeteilt. Die Materialparameter für die einzelnen Zonen können Ta-
belle 11 entnommen werden. Es handelt sich um die Parameter für das mikromechani-
sche Materialmodell Gologanu-Leblond-Devau (GLD).

Zone	q	fn	SN	epsin	alpha	beta	H0/R0	EmbFac
GW	1,5	0,02	0,1	0,4	0,1	1,2	1,0	1,0
WEZ	1,5	0,02	0,1	0,3	0,1	1,2	1,0	1,0
SG	1,5	0,02	0,1	0,3	0,1	1,2	1,0	1,0

Tabelle 11 GLD-Materialparameter für HCT600XD [Som09]

In Bild 80 sind die Ergebnisse der Maximalkräfte über die Blechdicken für Scherzug auf-
getragen. Für die Blechdicken 0,75 mm und 1,5 mm ist der Schweißpunkt im Grund-
werkstoff ausgeknöpft, für die Blechdicken 2,25mm, 3 mm und 3,75mm ist der
Schweißpunkt abgesichert.

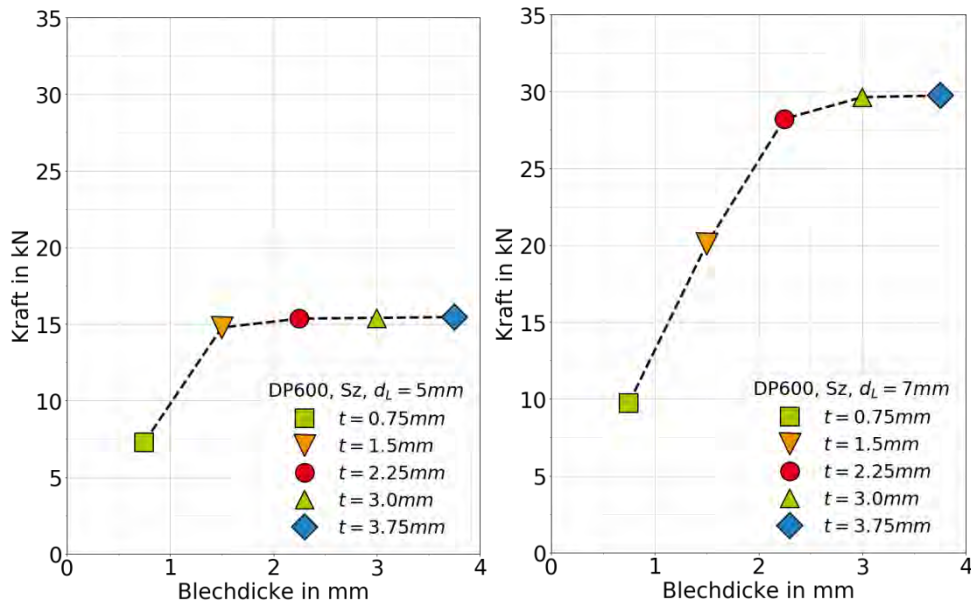


Bild 80
Maximalkräfte einer Zwei-blechverbindung HCT600XD mit Schweißlinsendurchmesser $d_L = 5\text{ mm}$ (links) und $d_L = 7\text{ mm}$ (rechts) für unterschiedliche Blechdicken unter Scherzug

Die ermittelte Obergrenze für die Tragfähigkeit einer Schweißlinse unter Scherbelastung für HCT600XD wurde mit der Scherfestigkeit des Schweißguts aus einer experimentellen Charakterisierung aus [Som09] verglichen. Dazu wurde die Scherfestigkeit des Schweißguts τ_{SG} mit der Linsenfläche multipliziert. Es ist eine gute Übereinstimmung zu erkennen. Daraus wurde ein Ansatz entwickelt anhand dessen die Obergrenze der Tragfähigkeit aus der Charakterisierung des Schweißguts abgeleitet werden kann.

Aus bereits abgeschlossenen Projekten ([GSB+12], [SBB14], [Som09] und [GSB+12]) sind gegleebelte Schweißgutproben für unterschiedliche Werkstoffe vorhanden. Die Daten für DC04 wurden im Rahmen dieser Arbeit erhoben. Die Werte der Scherzugproben wurden ausgewertet, um daraus künstliche Werte für die Obergrenze erstellt. Die Gültigkeit der Annahme wurde an HCT600XD beispielhaft überprüft. Für einen Linsendurchmesser $d_L = 5\text{ mm}$ wurde über die Simulation eine Maximalkraft von $F_{max} = 15,5\text{ kN}$ und von $F_{max} = 17,8\text{ kN}$ mit dem analytischen Ansatz ermittelt. Für einen Linsendurchmesser von $d_L = 7\text{ mm}$ wurden analog die Maximalkräfte $F_{max} = 29,7\text{ kN}$ und $F_{max} = 34,6\text{ kN}$ bestimmt.

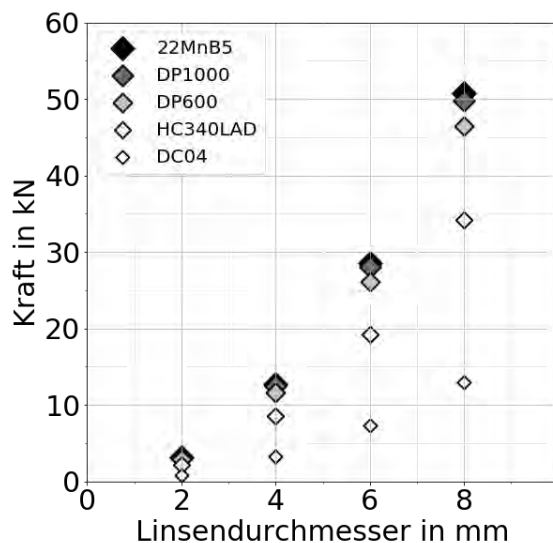


Bild 81
Künstliche Werte als Obergrenze für Blechdicken > 3mm aus experimentellen Charakterisierungen der Scherfestigkeit von Schweißgut abgeleitet

Als Blechdicke wurde ein Wert von $t = 3\text{mm}$ eingesetzt. Insgesamt wurden 20 Werte für die Obergrenze eingefügt. Tabelle 12 enthält die Scherfestigkeiten der unterschiedlichen Werkstoffe aus Charakterisierungsversuchen des Schweißguts unter Scherung. Für die Werkstoffe HC340LAD und DC04 lagen nur Charakterisierungen der Wärmeeinflusszone vor. Da nur wenig Unterschied zwischen Wärmeeinflusszone und Schweißgut für diese Werkstoffe erwartet wird, wurden diese Werte ersatzweise verwendet.

Quelle	Zugfestigkeit Grundwerkstoff [MPa]	Probenform	Maximalkraft [kN]	Belastete Scherfläche [mm ²]	Scherfestigkeit Schweißgut [MPa]	
Werkstoffe						
22MnB5	[GSB+12]	1520	Scherzug 0°	4,7	4,6	1008
HCT980XD	[SBB14]	1000	Scherzug 0°	5,8	5,8	990
HCT600XD	[Som09]	600	Scherzug 0°	5,3	5,7	924
HC340LAD*	[GSB+12]	410	Scherzug 0°	3,8	5,6	680
DC04*		290	Scherzug 0°	1,1	4,3	258

*WEZ-Gefüge

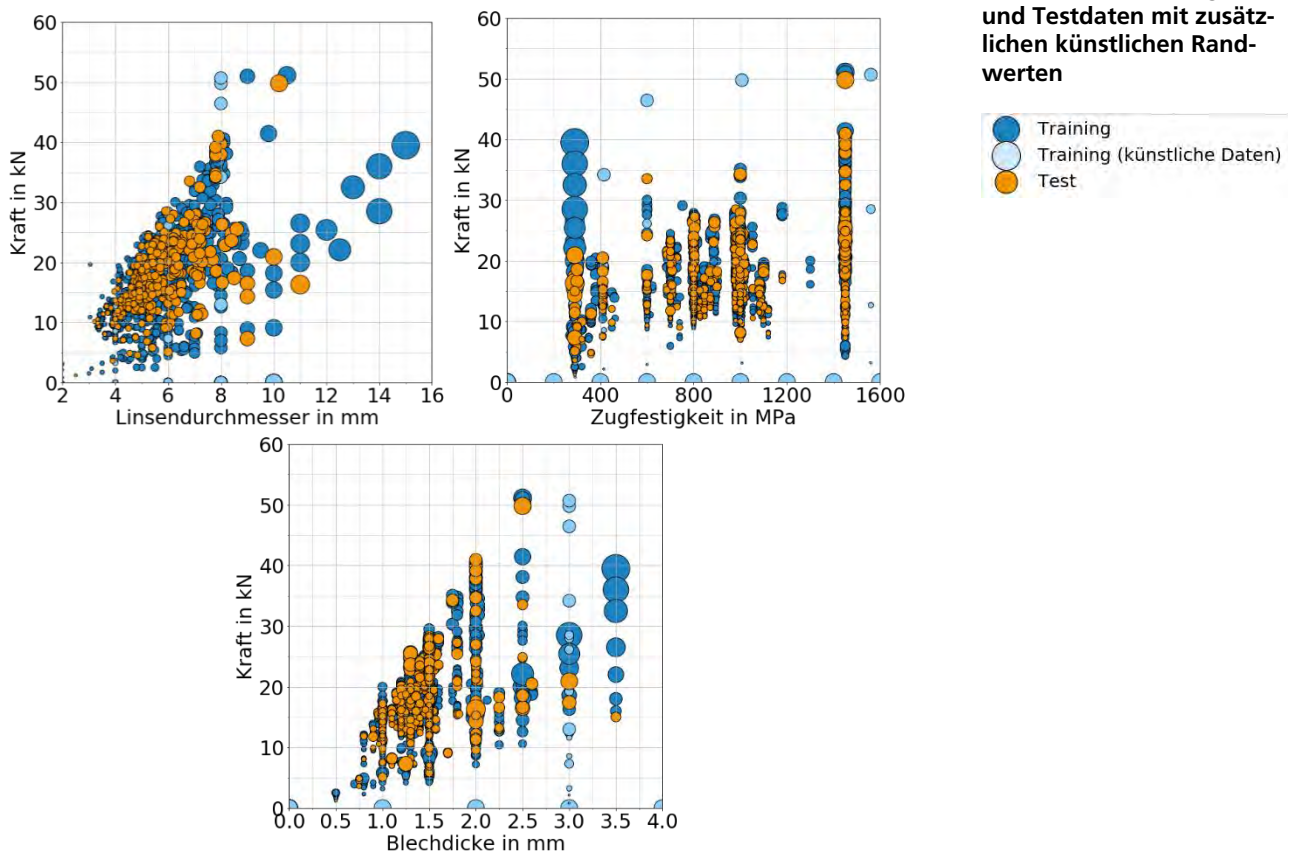
Tabelle 12 Scherfestigkeiten des Schweißguts aus unterschiedlichen Quellen

4.5 Scherzug-Modell

In diesem Kapitel wird die Datenbasis für die Modellerstellung erläutert. Das Modell, welches erstellt wurde, wird beschrieben und anschließend für verschiedene ungleichartige Verbindungen validiert. Es werden zusätzliche Änderungen zum Vorgehen aus 4.2.4 erläutert. Für die Rastermittlung wurden die Schrittweiten $\Delta d_L = 0,4\text{ mm}$, $\Delta t = 0,2\text{ mm}$ und $\Delta R_m = 50\text{ MPa}$ verwendet. Die Aufteilung in Trainingsdaten und Testdaten wird zufällig durchgeführt. Dazu verwendet scikit-learn einen Zufallsgenerator. Mit der Variable *random_state* kann ein *random_seed* gesetzt werden, der sichergestellt, dass der Zufallsgenerator bei jedem Durchlauf die gleiche zufällige Aufteilung vornimmt. Der Programmablauf in 4.2.4 wurde der *random_seed* von 1 bis 20 wiederholt. So ergeben sich 20 Anpassungen für die beiden gesuchten Hyperparameter. Allerdings war der Polynomgrad nicht für jeden *random_seed* gleich. Es ließ sich jedoch eine Tendenz zum Polynomgrad $n = 5$ erkennen. Dieser wurde bei 12 der 20 Anpassungen als Optimum gewählt. Anschließend wurde der Programmablauf erneut wiederholt. Diesmal wurde der Polynomgrad $n = 5$ festgehalten, so dass nur der Regularisierungsfaktor λ angepasst wurde. Da hier die Abstufung der Suche deutlich feiner ist, konnte ein Bereich identifiziert werden, der sich in den unterschiedlichen Zufallsaufteilungen als Optimum erwies. Es wurde der Mittelwert aus dem am deutlichsten hervorgetretenen λ Werten berechnet. Es ergab sich ein Wert von $\lambda = 0,00007789$. Anschließend wurde Ridge Regression Verfahren mit diesen Parametern durchgeführt auf eine der Test-/Trainungseinteilungen, die das λ deutlich gewählt hatten. Das resultierende Bestimmtheitsmaß liegt bei 0,7967.

4.5.1 Datenauswahl

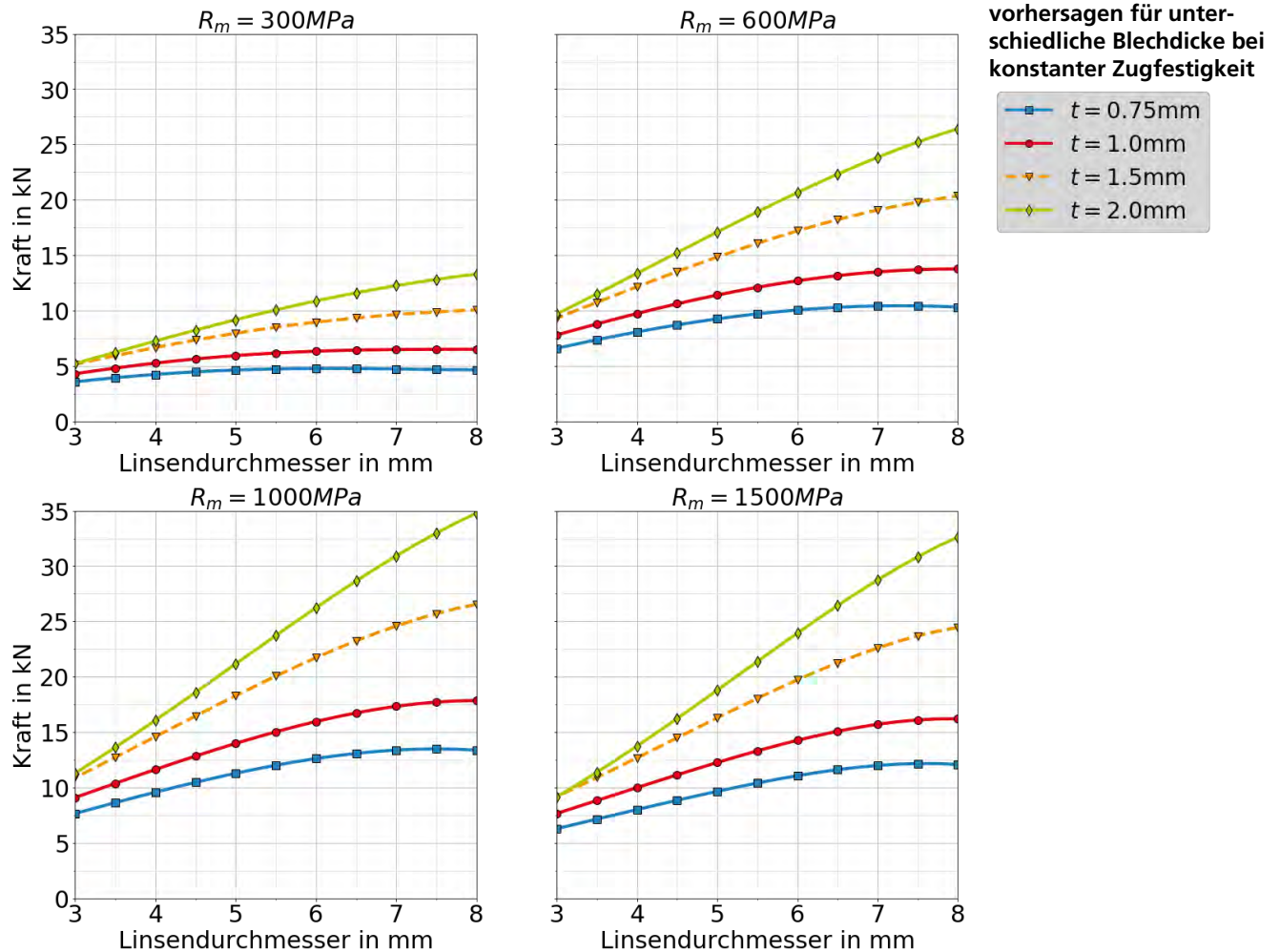
Hier wird zusammenfassend ein Überblick über die verwendeten Daten gegeben. Es wurden ausschließlich Versuche von einfach überlappten Scherzugproben verwendet. Die Datenbasis enthält also keine KS2-0°-Proben. Insgesamt werden 2625 Daten für die Modellerstellung aus der Datenbank gefiltert. Davon werden 20% als Testdaten (525) herangezogen und die restlichen 2100 Daten sind Trainingsdaten. Den Trainingsdaten wurden zusätzlich künstliche Daten zugeordnet. Für die untere Grenze sind es 97 Datenpunkte für die obere Grenze 20 Datenpunkte. Nach der Rastererstellung reduziert sich die Anzahl der Trainingsdaten auf 459. In Bild 82 ist die Aufteilung des Datensatzes in Trainingsdaten (Dunkelblau), künstliche Trainingsdaten (Hellblau) und Testdaten (Orange) dargestellt. Die Größe des dargestellten Kreises wird mit der Größe des Linsendurchmessers skaliert.



Der Linsendurchmesser ist ein wichtiges Merkmal. Jedoch ist die Messung des Linsendurchmessers mit der größten Unsicherheit behaftet. Der Linsendurchmesser kann nur über einen Schliff mit hoher Genauigkeit bestimmt werden, was jedoch mit einem hohen Aufwand verbunden ist.

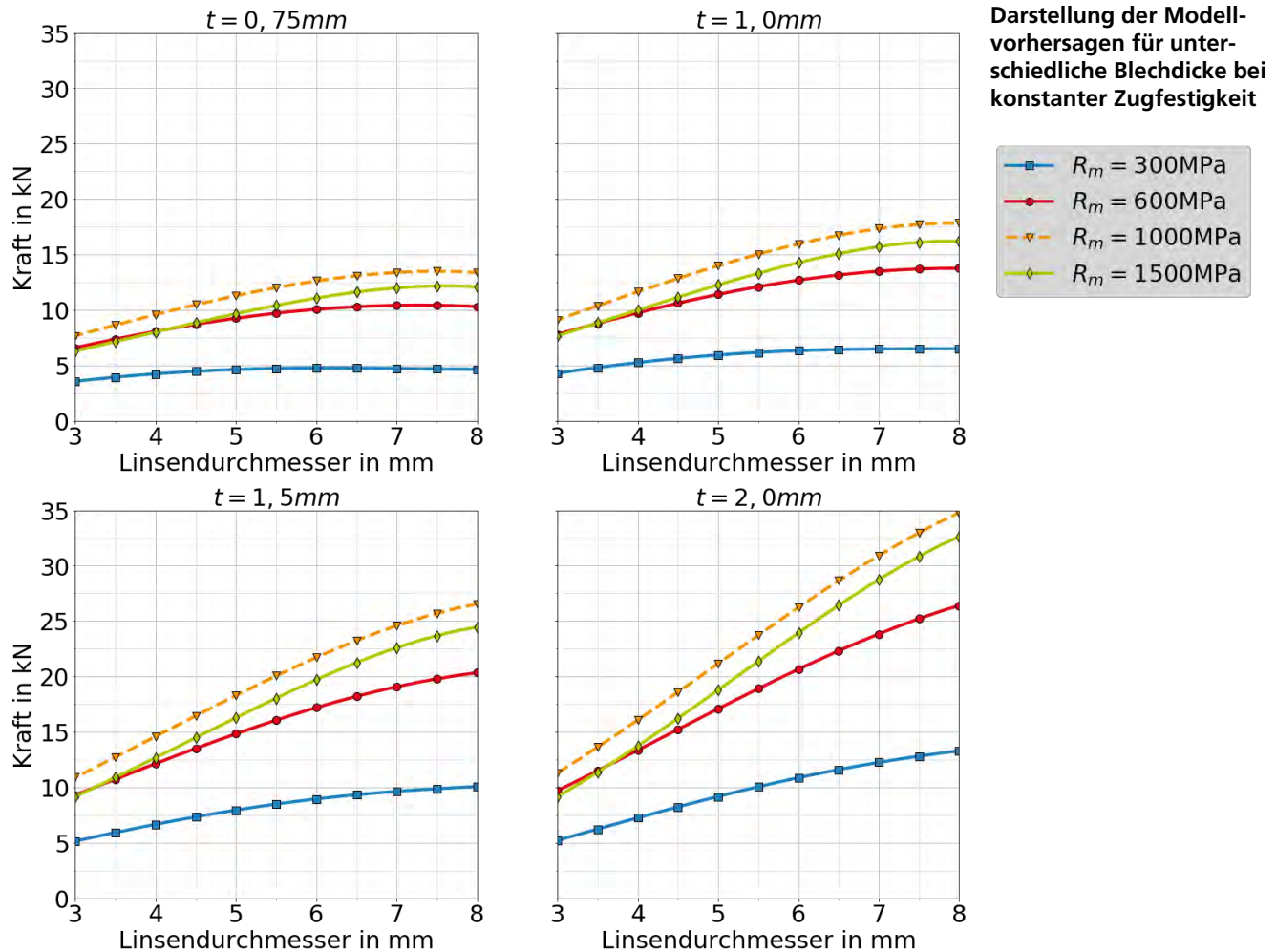
4.5.2 Plausibilitätsanalyse

Das Bestimmtheitsmaß eignet sich zur Leistungsbewertung eines Modells. Es ist ein reiner Fehlerwert, der quantitativ die Güte des Modells beschreibt. Daneben sollen auch qualitativ die vorhergesagten Abhängigkeiten bewertet werden. Das Bestimmtheitsmaß kann von den der Datengüte und –menge der Testdaten abhängen. Mit der qualitativen Betrachtung der Kurvenverläufe soll zusätzlich überprüft werden, ob das Modell physikalisch sinnvoll verläuft.



In Bild 83 ist das Modell für vier unterschiedliche konstante Zugfestigkeiten dargestellt. Die einzelnen Kurven stellen die Vorhersagen der Kraft über den Linsendurchmesser für eine konstante Blechdicke dar. In Blau ist die kleinste Blechdicke mit $t = 0,75\text{ mm}$ dargestellt, in Rot die Blechdicke $t = 1,0\text{ mm}$, in Orange die Blechdicke $t = 1,5\text{ mm}$ und in Grün die größte Blechdicke mit $t = 2,0\text{ mm}$. Für sehr kleine Linsendurchmesser sollte das Modell nicht angewendet werden. Linsenbildungen mit $d_L < 3\text{ mm}$ sind oft nicht möglich und es wird lediglich ein Anhaften der Bleche erreicht. Linsendurchmesser in dieser Größenordnung sind in der Anwendung für Blechdicken, wie sie in der Automobilbranche eingesetzt werden auch kaum anzutreffen, daher wird nur der Bereich zwischen $d_L = 3\text{ mm}$ und $d_L = 8\text{ mm}$ dargestellt. Mit zunehmender Zugfestigkeit verlaufen die Kurven steiler. Dieser Effekt ist umso stärker ausgeprägt umso dicker das Blech ist. Der Einfluss des Linsendurchmessers nimmt sowohl bei steigender Zugfestigkeit als auch bei steigender Blechdicke zu.

Die Steigung der Kurven von 1000 MPa zu 1500 MPa ist ähnlich. Die Kurven für die Zugfestigkeit 1500 MPa haben jedoch ein leicht abgemindertes Niveau (ca. 5 kN) gegenüber den Kurven bei 1000 MPa.



In Bild 84 ist das Modell für vier unterschiedliche konstante Blechdicken dargestellt. In dieser Darstellung ist die Abminderung der vorhergesagten Maximalkraft bei einer Zugfestigkeit von 1500 MPa (Grün) gegenüber der Maximalkraft bei einer Zugfestigkeit von 1000 MPa (Orange) noch deutlicher zu erkennen. Bei kleinen Blechdicken ist eine höhere Rotation der Scherzugprobe zu beobachten. Dies führt zu einer Erhöhung des Kopfzuganteils. Höchstharte Stähle weisen eine Kopfzugempfindlichkeit auf. Damit ist eine Abminderung der Tragfähigkeit unter Kopfzug gemeint. Das Modell gibt dieses Phänomen qualitativ korrekt wieder. Insgesamt sind die Zusammenhänge zwischen Blechdicke, Linsendurchmesser, Zugfestigkeit und Maximalkraft in der Modellvorhersage plausibel.

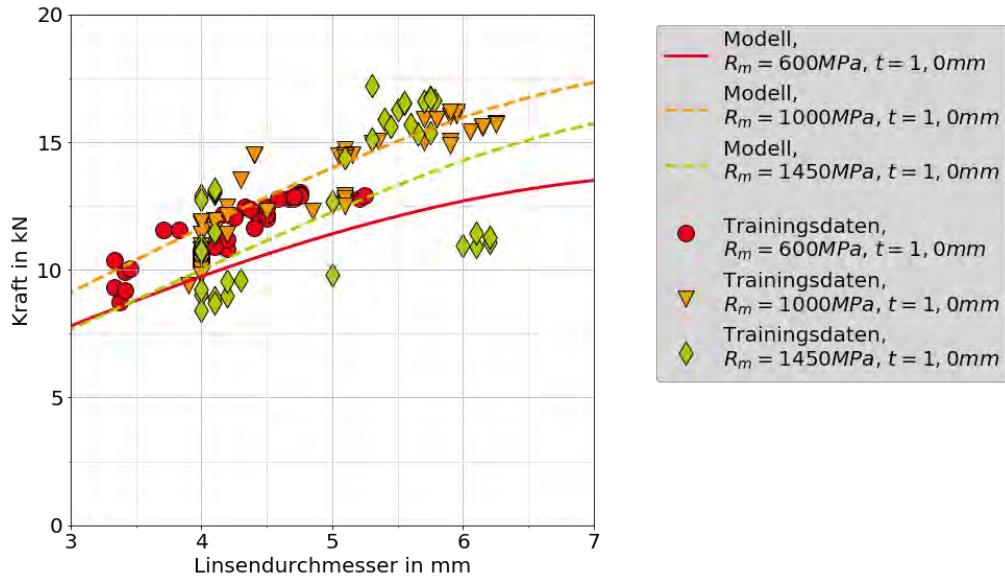


Bild 85
Modellvorhersagen für Zugfestigkeiten 600 MPa, 1000 MPa und 1450 MPa und konstanter Blechdicke $t=1,0$ mm und Trainingsdaten aus der Datenbank mit gleichen Parametergrößen

In Bild 85 sind die Modellvorhersagen für drei Zugfestigkeiten (600 MPa, 1000 MPa, 1450 MPa) bei konstanter Blechdicke (1 mm) dargestellt. Die Marker stellen die Trainingsdaten dar, die für die Ridge Regression Anpassung zur Anwendung kamen. Die roten Kreise sind die Trainingsdaten für die Zugfestigkeit 600 MPa, die orangenen Dreiecke für die Zugfestigkeit 1000 MPa und die grünen Rauten für die Zugfestigkeit 1450 MPa. Sowohl die Kurve für $R_m = 1000$ MPa als auch $R_m = 1450$ MPa zeigen eine gute Anpassung an die zugrundeliegenden Trainingsdaten. Die Kurve der Zugfestigkeit $R_m = 600$ MPa zeigt eine leichte Verschiebung zu niedrigeren Kräften. Alle Datensätze für gleichartige Verbindungen aus $R_m = 600$ MPa haben eine Blechdicke von mindestens $t = 1$ mm. Die Verschiebung könnte auf die künstlichen Daten für Blechdicken mit $t = 0$ mm zurückzuführen sein. Zugunsten eines rechteckigen Gültigkeitsbereichs ist hier eine Verschiebung in den unteren Streubereich zu erkennen.

4.5.3 Übertragung auf ungleichartige Verbindungen

Zur Überprüfung des Lösungsansatzes aus 4.1 wird das Modell auf verschiedene ungleichartige Verbindungen angewandt und anhand von experimentellen Daten validiert.

In Bild 86 wird die Vorhersage für die ungleichartige Verbindung mit 22MnB5 (1,5 mm) und HCT780XD (1,0 mm) überprüft. Dazu wird zunächst die Modellvorhersage für zwei gleichartige Verbindungen geplottet. Die rote Linie zeigt die Modellvorhersage für eine Zugfestigkeit von 1450 MPa bei einer Blechdicke von 1,5 mm, die blaue Linie zeigt die Modellvorhersage für eine Zugfestigkeit von 800 MPa bei einer Blechdicke von 1,0 mm. Weiterhin sind hellrote Punkte eingetragen, die für das Training des Modells verwendet wurden und der Zugfestigkeit 1450 MPa und Blechdicke 1,5 mm entsprechen. Die hellblauen Punkte zeigen die Trainingsdaten mit Zugfestigkeit 800 MPa und Blechdicke 1,0 mm. Es ist zu erkennen, dass die Modellvorhersagen unter Berücksichtigung der Streuung gute Anpassungen zeigen. Die Streuung für die Daten mit 800 MPa (1,0 mm) ist deutlich kleiner als für die Daten mit 1450 MPa (1,5 mm). Der Martensitstahl 22MnB5 weist vielfältige, durch den Schweißvorgang verursachte, Gefügeveränderungen auf. Dazu gehören die Ausprägung einer Erweichungszone, das Auftreten von Entkohlung an der Linsengrenze und eine Versprödung des Linsengefüges.

Zur Vorhersage der Versagenskraft wird die kleinere der vorhergesagten Kräfte angewendet. Für den Bereich von Linsendurchmesser zwischen 4,5 mm und 5,2 mm sind das die Werte der blauen Kurve. Die eingezeichneten experimentellen Ergebnisse sind die Versuchsreihen 1a-1 ($d_L = 4,5 \text{ mm}$), 1a-2 ($d_L = 5,2 \text{ mm}$), und 1a-3 ($d_L = 4,8 \text{ mm}$) aus Kapitel 3.

Die vorhergesagten Kräfte zeigen eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen.

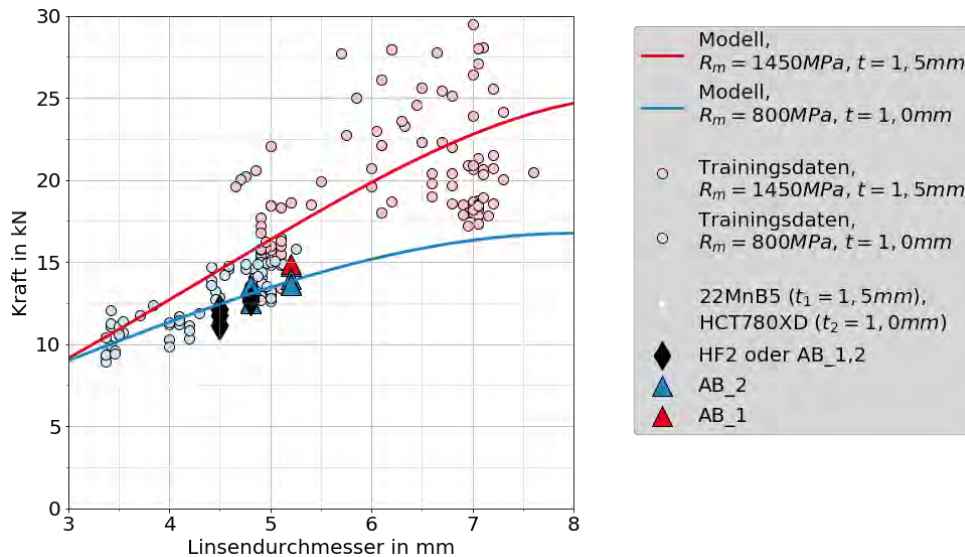


Bild 86
Modellvorhersagen für 22MnB5 mit 1,5 mm und für HCT780XD mit 1,0 mm im Vergleich mit experimentellen Daten der ungleichartigen Verbindung
 HF: Haftschiweißung
 AB_1,2: Ausknöpfen aus Blech 1 und Blech 2
 AB_2: Ausknöpfen aus Blech 2
 AB_1: Ausknöpfen aus Blech 1

In Bild 87 wurde der Ansatz für eine weitere ungleichartige Materialkombination validiert. Der erste Fügepartner ist wieder 22MnB5 in 1,5 mm Blechdicke, der zweite Fügepartner ist HCT780XD in 2,0 mm Blechdicke. Die rote Kurve in Bild 87 ist gleich der roten Kurve in Bild 86, da es der gleiche erste Fügepartner ist. Die blaue Kurve in Bild 87 beschreibt den gleichen Werkstoff wie in Bild 86, allerdings in einer höheren Blechdicke. Für diese Kombination liegen die vorhergesagten Werte der gleichartigen Verbindung für 800 MPa deutlich höher als die für 1450 MPa aufgrund der Blechdicke von 2 mm. Die eingezeichneten Ergebnisse stammen aus den Versuchsreihen 1a-7 ($d_L = 5,8 \text{ mm}$), 1a-8 ($d_L = 7,1 \text{ mm}$) und 1a-9 ($d_L = 6,4 \text{ mm}$). Für die Vorhersage der ungleichartigen Verbindung gilt hier im Bereich des Linsendurchmessers zwischen 5,8 mm und 7,1 mm, die Vorhersage der roten Kurve.

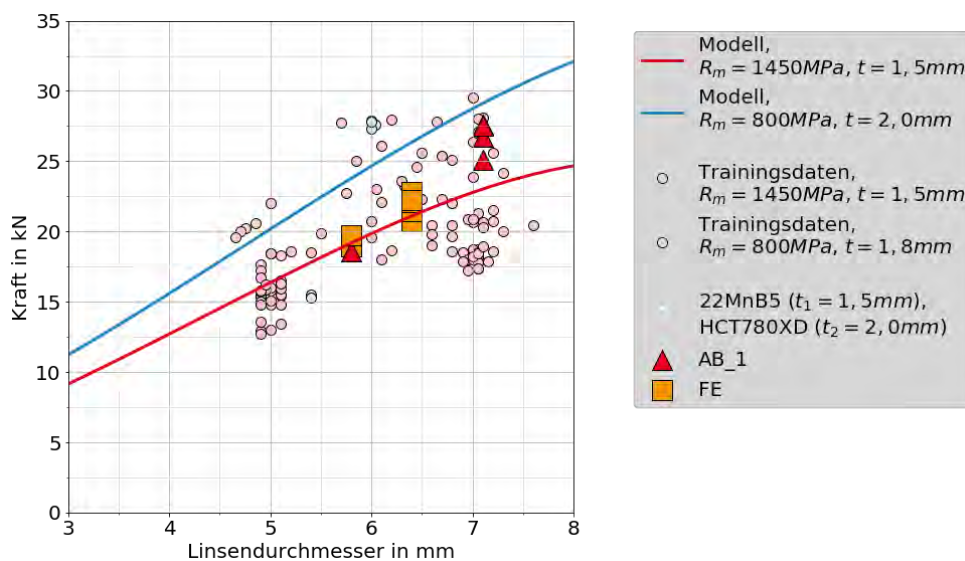


Bild 87
Modellvorhersagen für 22MnB5 mit 1,5 mm und für HCT780XD mit 2,0 mm im Vergleich mit experimentellen Daten der ungleichartigen Verbindung

Hier ist anzumerken, dass die Versuche bei $d_L = 7,1 \text{ mm}$ (Versuchsreihe 1a-8) ein Ausknöpfen aus der Erweichungszone aufweisen. In dem verwendeten Vorhersagemodell wurden nur drei Merkmale (d_L, t, R_m) verwendet. Die Ausprägung der Erweichungszone wird nicht berücksichtigt. Die Breite der Erweichungszone ist nicht notwendigerweise fest an den Linsendurchmesser gebunden. Es ist denkbar, dass Punktschweißverbindungen an 22MnB5 möglich sind, die den gleichen Linsendurchmesser aufweisen, aber unterschiedlich breite Erweichungszonen. Es ist möglich, dass unterschiedliche Ausprägungen der Wärmeeinflusszone und Erweichungszone die Streuungen in den Trainingsdaten verursachen. Außerdem wurde die Zugfestigkeit von 22MnB5 mit dem Wert 1450 MPa ergänzt. Zwar wurden Datensätze, für die der 22MnB5 nicht durchgehärtet wurde, vorher herausgefiltert. Dennoch kann es aufgrund des zusätzlichen Prozessschritts des Presshärtevorgangs auch bei komplett durchgehärteten Blechen zu Variationen in der resultierenden Zugfestigkeit kommen.

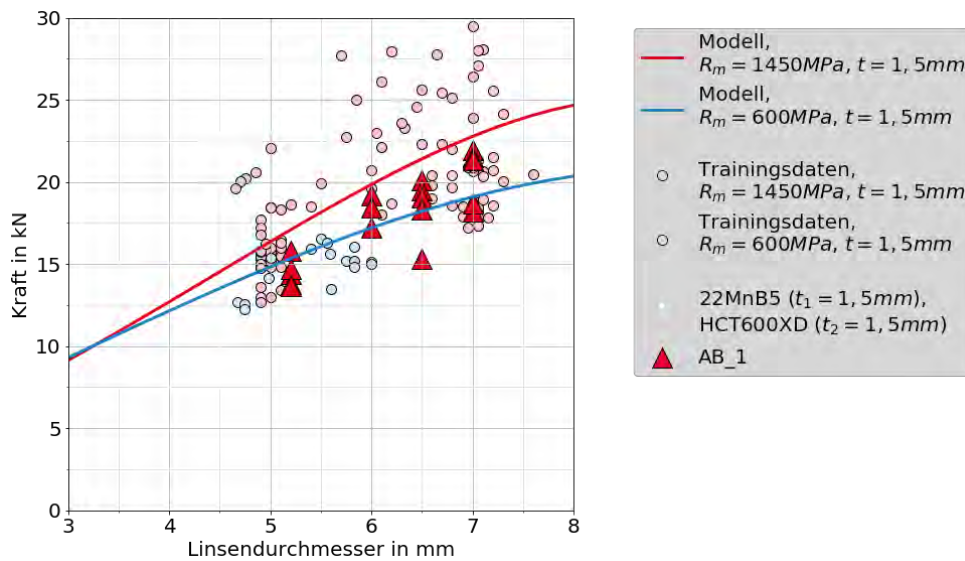


Bild 88
 Modellvorhersagen für 22MnB5 mit 1,5 mm und für HCT600XD mit 1,5 mm im Vergleich mit experimentellen Daten der ungleichartigen Verbindung

In Bild 88 ist eine weitere Verbindung aus Kapitel 3 dargestellt. Es handelt sich um die experimentellen Ergebnisse der Versuchsreihen 1b-1 ($d_L = 5,2 \text{ mm}$), 1b-2 ($d_L = 7,0 \text{ mm}$), 1b-3 ($d_L = 6,5 \text{ mm}$) und 1b-7 ($d_L = 6,0 \text{ mm}$). Alle Versuche dieser Reihen zeigten einen Ausknöpfbruch aus dem pressgehärteten Stahl. Da die blaue Linie unterhalb der roten Linie liegt, gilt für den Modellansatz, dass ein Versagen in HCT600XD erwartet wird. Die Streuung in den Messdaten für den pressgehärteten Stahl ist sehr groß. Die Messdaten liegen innerhalb der Punktwolke der hellroten Trainingsdaten. Wäre die Vorhersage für 22MnB5 (1,5 mm) gewählt worden, hätte die Vorhersage eine etwas zu hohe Maximalkraft vorhergesagt.

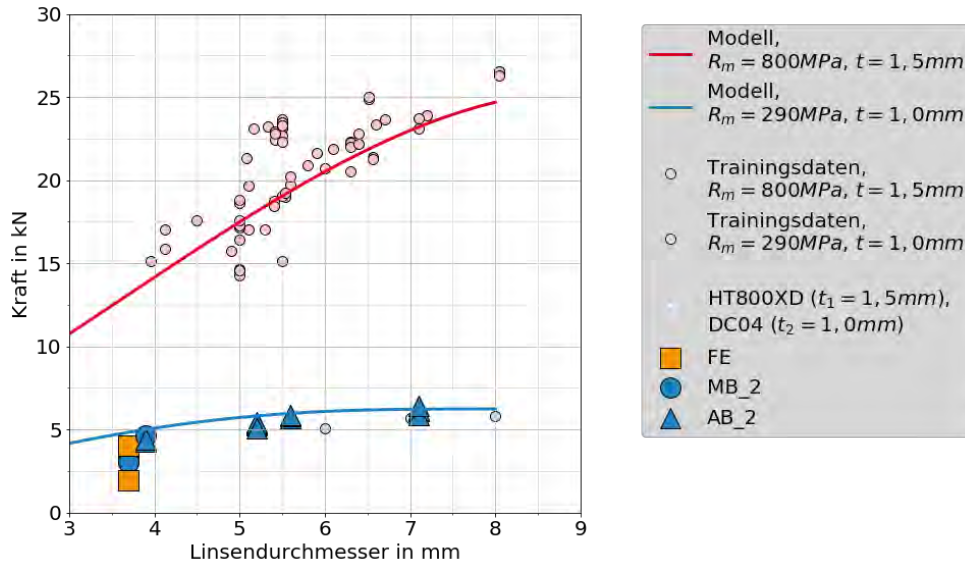


Bild 89
Modellvorhersagen für HCT780XD mit 1,5 mm und für DC04 mit 1,0 mm im Vergleich mit experimentellen Daten der ungleichartigen Verbindung

In Bild 89 zeigt die rote Kurve die Modellvorhersage für eine Zugfestigkeit von 800 MPa bei einer Blechdicke von 1,5 mm, die blaue Kurve zeigt die Modellvorhersage für eine Zugfestigkeit von 290 MPa bei einer Blechdicke von 1,0 mm. Weiterhin sind hellrote Punkte eingetragen, die für das Training des Modells verwendet wurden und der Zugfestigkeit 800 MPa und Blechdicke 1,5 mm entsprechen. Die hellblauen Punkte zeigen die Trainingsdaten mit Zugfestigkeit 290 MPa und Blechdicke 1,0 mm. Die rote Kurve zeigt einen guten Kompromiss für das Streuverhalten der Trainingsdaten für HCT780XD (1,5 mm). Die experimentellen Daten stammen aus Versuchsreihe 1c und zeigen überwiegend ein Ausknöpfen aus DC04 (blaue Dreiecke). Für den kleinsten Linsendurchmesser von 3,7 mm ist die Abweichung für die Modellvorhersage am größten. Für die Wiederholversuche, die mit Fügeebenenbruch versagt haben, ist nicht eindeutig, ob es sich wirklich um eine Verschweißung gehandelt hat oder ob es lediglich zu einem Anhaften des Blechs kam.

Da es in den untersuchten Verbindungen aus Kapitel 3 bis auf die Versuchsreihe 1c überwiegend zu einem Versagen in 22MnB5 kam werden nun weitere Verbindungen untersucht, die aus anderen öffentlichen Projekten stammen. In [Som06] wurde eine Verbindung aus HCT600XD (1,5 mm) und DX54 (1,5 mm) untersucht. In Bild 90 sind wieder die Modellvorhersagen für die analogen gleichartigen Verbindungen, die zugrundeliegenden Trainingsdaten und die experimentellen Ergebnisse für die ungleichartige Verbindung dargestellt. Der Modellansatz liefert eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen.

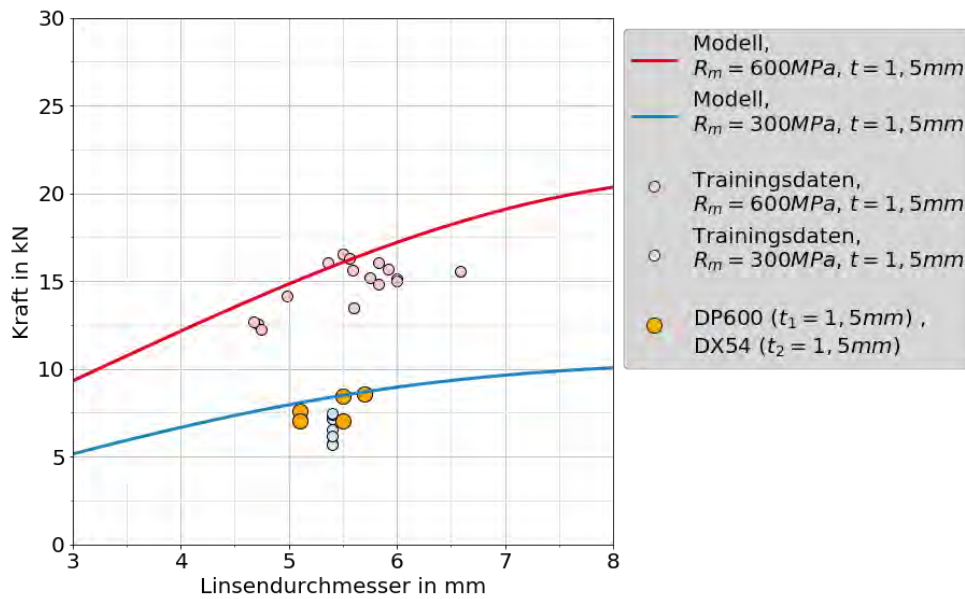


Bild 90
 Modellvorhersagen für HCT600XD mit 1,5 mm und für DX54 mit 1,5 mm im Vergleich mit experimentellen Daten der ungleichartigen Verbindung aus Trainingsdaten und aus [Som06]

In Tabelle 13 sind die Ergebnisse der Vorhersage und der experimentellen Ergebnisse für alle Versuche der Versuchsreihen 1a, 1b und 1c aufgeführt. Die größte prozentuale Abweichung ist für die Versuchsreihe 1c-1 zu beobachten. Das ist die Versuchsreihe mit dem kleinsten Linsendurchmesser für die Kombination HCT780XD (1,5 mm) und DC04 (1,0 mm). Aus den Bruchbildern geht hervor, dass es bei diesen Verbindungen möglicherweise nur zu einem Anhaften gekommen ist und keine Schweißlinse ausgebildet wurde. Für Versuchsreihe 1c-3 beträgt die Abweichung 10%, für 1c-4 beträgt die Abweichung 12%. Die absolute Abweichung beträgt in beiden Fällen 0,5 kN.

Ver- suchs- reihe	R_{m1} [MPa]	t_1 [mm]	R_{m2} [MPa]	t_2 [mm]	d_L [mm]	$F_{max,1}$ [kN]	$F_{max,2}$ [kN]	$F_{max,pred}$ [kN]	$\bar{F}_{max,exp}$ [kN]	Δ [%]
1a-1	1450	1,5	800	1	4,5	14,5	12,4	12,4	11,7	-7
1a-2	1450	1,5	800	1	5,2	17,1	13,8	13,8	14,2	2
1a-3	1450	1,5	800	1	4,8	15,6	13,1	13,1	12,8	-2
1a-4	1450	1,5	800	1,5	4,7	15,3	16,5	15,3	14,9	-3
1a-5	1450	1,5	800	1,5	6,9	22,5	22,8	22,5	21,8	-3
1a-6	1450	1,5	800	1,5	5,7	18,8	19,6	18,8	17,3	-9
1a-7	1450	1,5	800	2	5,8	19,2	23,8	19,2	19,1	-1
1a-8	1450	1,5	800	2	7,1	23	29,1	23	26,9	14
1a-9	1450	1,5	800	2	6,4	21,1	26,4	21,1	21,9	4
1a-10	1450	1,5	800	1,3	4,8	15,6	15,5	15,5	13,4	-15
1a-11	1450	1,5	800	1,3	6	19,8	18,5	18,5	15,6	-18
1a-12	1450	1,5	800	1,8	5,9	19,5	22,8	19,5	20	3
1a-13	1450	1,5	800	1,8	6,6	21,7	25,3	21,7	22,7	5
1a-14	1450	1,5	800	1,5	5,5	18,1	19	18,1	15,4	-18
1a-15	1450	1,5	800	1,5	6,4	21,1	21,6	21,1	17,5	-21
1b-1	1450	1,5	600	1,5	5,2	17,1	15,3	15,3	14,5	-6
1b-2	1450	1,5	600	1,5	7	22,8	19,1	19,1	20,3	6
1b-3	1450	1,5	600	1,5	6,5	21,4	18,2	18,2	18,5	1
1b-4	1450	1,5	1000	1,5	5,6	18,5	20,4	18,5	17,5	-6
1b-5	1450	1,5	1000	1,5	7,2	23,2	25,1	23,2	24,3	4
1b-6	1450	1,5	1000	1,5	7	22,8	24,6	22,8	22,6	-1
1b-7	1450	1,5	600	1,5	6	19,8	17,2	17,2	18,3	6
1b-8	1450	1,5	1000	1,5	7,1	23	24,8	23	25,6	10
1c-1	800	1,5	290	1	3,7	13,1	4,8	4,8	3,2	-51
1c-2	800	1,5	290	1	7,1	23,2	6,2	6,2	6,2	-1
1c-3	800	1,5	290	1	5,2	18,1	5,8	5,8	5,3	-10
1c-4	800	1,5	290	1	3,9	13,8	5	5	4,5	-12
1c-5	800	1,5	290	1	5,6	19,3	6	6	5,8	-4

Tabelle 13 Vergleich von Modellvorhersagen Scherzug und experimentellen Ergebnissen für ungleichartige Verbindungen

4.6 Kopfzug-Modell

Es wurden die gleichen Schrittweiten für die Rastermittlung verwendet wie für den Scherzug ($\Delta d_L = 0,4 \text{ mm}$, $\Delta t = 0,2 \text{ mm}$ und $\Delta R_m = 50 \text{ MPa}$). Auch hier wurde der Programmablauf aus 4.2.4 für die *random_seed* Werte 1 bis 20 wiederholt. Es ergab sich erneut kein eindeutiges Ergebnis für den Polynomgrad n . Es ließ sich jedoch eine Tendenz zum Polynomgrad $n = 4$ erkennen. Anschließend wurde der Programmablauf erneut wiederholt. Diesmal wurde der Polynomgrad $n = 4$ festgehalten, so dass nur der Regularisierungsfaktor λ angepasst wurde. Da hier die Abstufung der Suche deutlich feiner ist, konnte ein Bereich identifiziert werden, der sich in den unterschiedlichen Zufallsaufteilungen als Optimum erwies. Es wurde der Mittelwert aus dem am deutlichsten hervorgetretenen λ Werten berechnet. Es ergab sich ein Wert von $\lambda = 0,00002653$. Anschließend wurde Ridge Regression Verfahren mit diesen Parametern durchgeführt auf eine der Test-/Trainingsaufteilungen, die für die das λ gewählt wurde. Das resultierende Bestimmtheitsmaß liegt bei 0,7768.

4.6.1 Datenauswahl

Für die Erstellung des Kopfzug-Modells wurden KS2-90° Proben und Kreuzzugproben verwendet. Bei diesen Probenformen ergibt sich eine nahezu identische Belastungssituation an der Fügspaltwurzel. Für die gleiche Verbindung werden daher vergleichbare Maximalkräfte erreicht. Insgesamt werden 2758 Daten aus der Datenbank gefiltert. Davon werden 20% als Testdaten (552) herangezogen und die restlichen 2206 Daten sind Trainingsdaten. Den Trainingsdaten wurden zusätzlich künstliche Daten zugeordnet. Für die untere Grenze sind es 97 Datenpunkte. Nach der Rastermittlung reduziert sich die Anzahl der Trainingsdaten auf 406. In Bild 91 ist die Aufteilung des Datensatzes in Trainingsdaten (Dunkelblau), künstliche Trainingsdaten (Hellblau) und Testdaten (Orange) dargestellt. Die Größe des dargestellten Kreises wird mit der Größe des Linsendurchmessers skaliert. Es ist zu erkennen, dass für Verbindungen mit einer Zugfestigkeit $1000 \text{ MPa} < R_m < 1450 \text{ MPa}$ nur wenige Daten vorhanden sind.

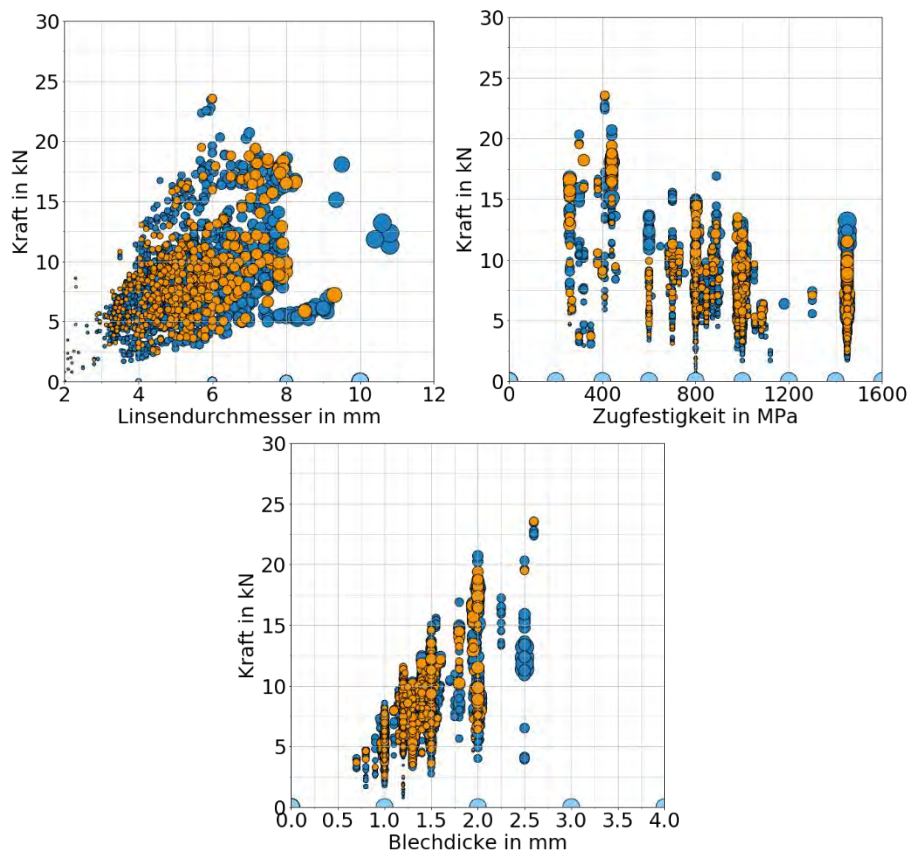
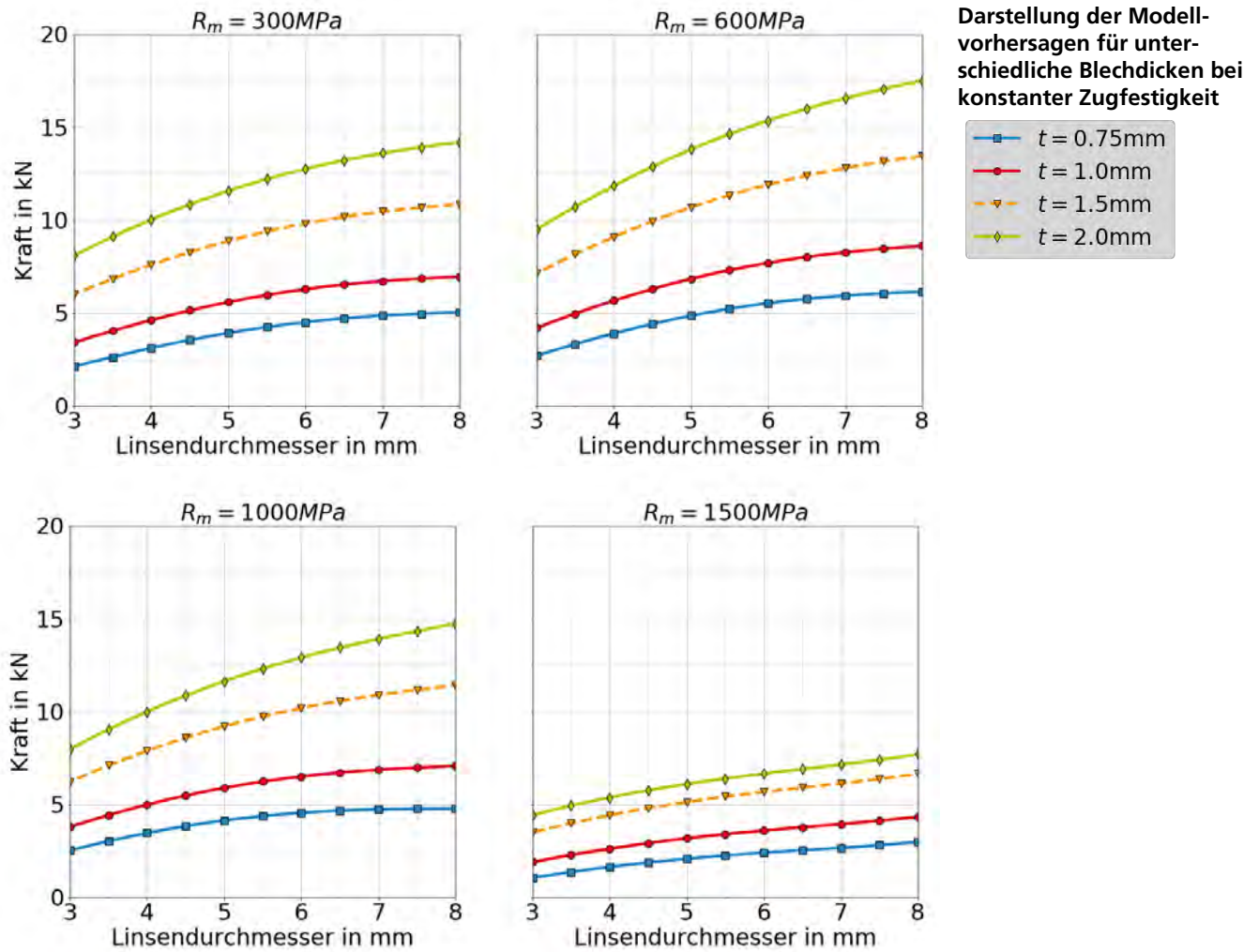


Bild 91
Verwendete Trainings-
und Testdaten mit zusätz-
lichen künstlichen Rand-
werten

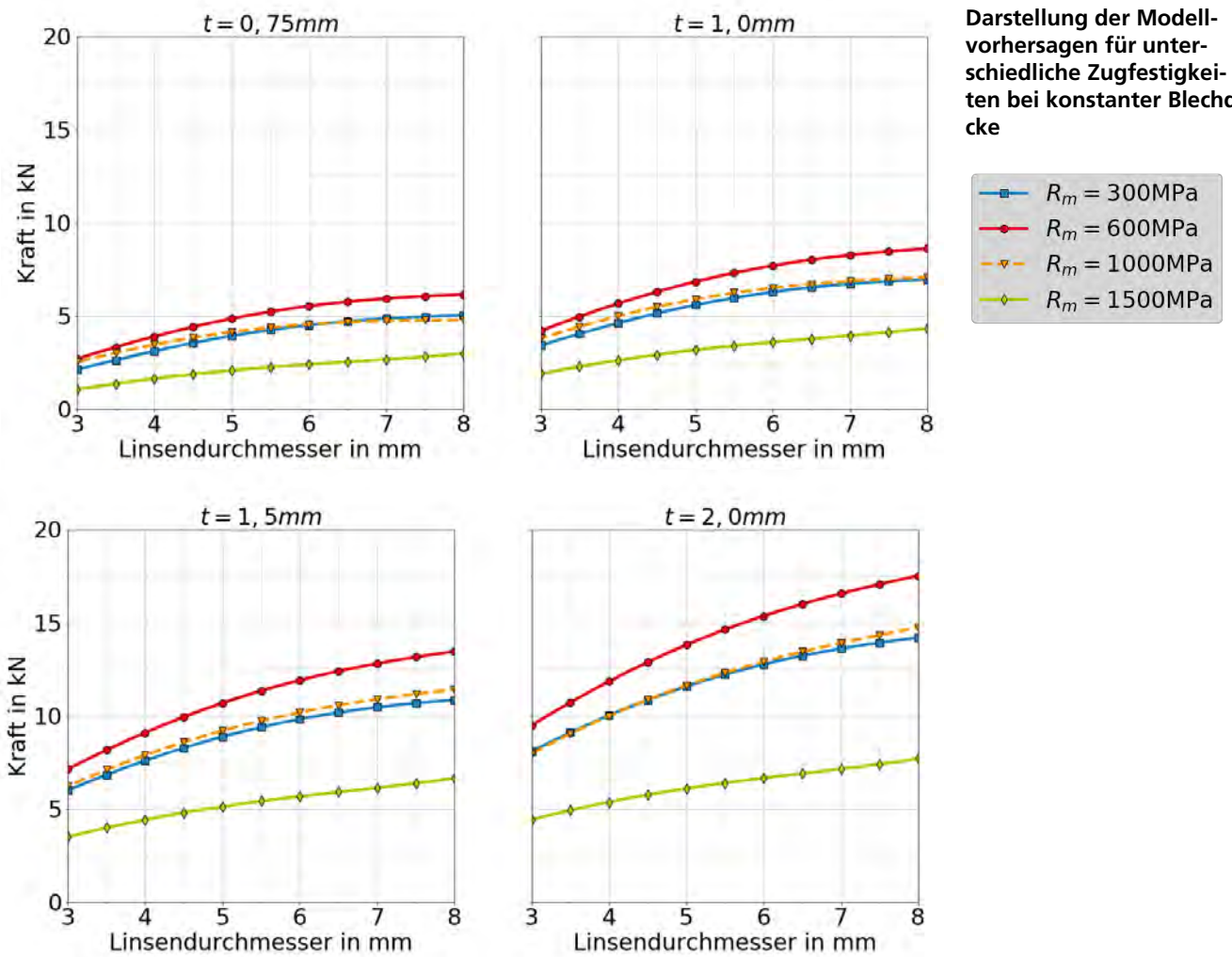
- Training
- Training (künstliche Daten)
- Test

4.6.2 Plausibilitätsanalyse

In Bild 92 ist das Modell für vier unterschiedliche konstante Zugfestigkeiten dargestellt. Die einzelnen Kurven stellen die Vorhersagen der Kraft über den Linsendurchmesser für eine konstante Blechdicke dar. In Blau ist die kleinste Blechdicke mit $t = 0,75 \text{ mm}$ dargestellt, in Rot die Blechdicke $t = 1,0 \text{ mm}$, in Orange die Blechdicke $t = 1,5 \text{ mm}$ und in Grün die größte Blechdicke mit $t = 2,0 \text{ mm}$.



Die vorhergesagten Kräfte für die Zugfestigkeit $R_m = 1500 \text{ MPa}$ sind am niedrigsten, die vorhergesagten Kräfte für die Zugfestigkeit $R_m = 600 \text{ MPa}$ sind am höchsten bei anderweitig festgehaltenen Größen. Der Einfluss des Linsendurchmessers ist für die Zugfestigkeit 1500 MPa am niedrigsten. Die Kurven verlaufen außerdem fast parallel, d.h. für alle Blechdicken steigt die Tragfähigkeit in der gleichen Rate. Für die anderen dargestellten Zugfestigkeiten nimmt der Einfluss des Linsendurchmessers mit steigender Blechdicke zu.



In Bild 93 sind Diagramme für konstante Blechdicken und variierende Zugfestigkeiten dargestellt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass die Kurve für $R_m = 1500\text{ MPa}$ für alle Blechdicken die niedrigsten Maximalkräfte vorhersagt. Für alle Blechdicken ist die Tragfähigkeit für die Zugfestigkeiten $R_m = 300\text{ MPa}$ und $R_m = 1000\text{ MPa}$ fast gleich.

Unter Kopfzug erreichen Verbindungen mit Fügepartnern der Zugfestigkeit $R_m = 600\text{ MPa}$ die höchsten Tragfähigkeiten.

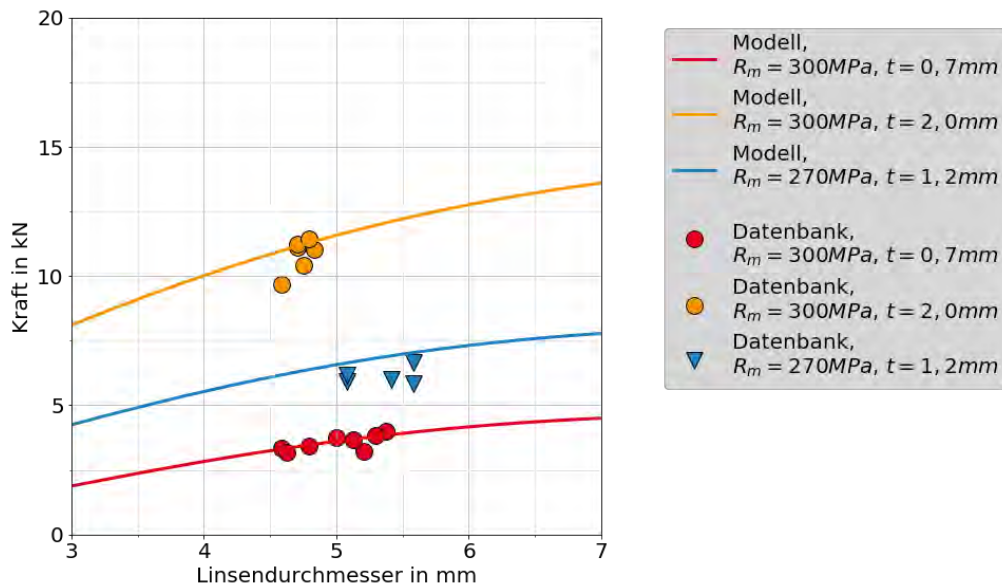


Bild 94
Modellvorhersagen für Zugfestigkeiten 300 MPa (0,7 mm), 300 MPa (2,0 mm) und 270 MPa (1,2 mm) im Vergleich zu experimentellen Ergebnissen aus der Datenbank mit gleichen Parametergrößen

In der Versuchsreihe 1c wurden Verbindungen mit HCT780XD und DC04 untersucht. In der Datenbank sind keine gleichartigen Verbindungen mit DC04 vorhanden. Die Zugfestigkeit wurde mit 290 MPa angegeben. In Bild 94 sind experimentelle Daten dargestellt mit Fügepartnern von ähnlicher Zugfestigkeit. Dies sind 300 MPa in Blechdicke 0,7 mm und 2,0 mm, sowie 270 MPa in 1,2 mm. Zusätzlich sind die Modellvorhersagen eingezeichnet. Das Modell zeigt eine gute Anpassung an die dargestellten experimentellen Daten.

4.6.3 Übertragung auf ungleichartige Verbindungen

In Bild 95 sind die experimentellen Ergebnisse der Versuchsreihen 1b-1, 1b-2, 1b-3 und 1b-7 dargestellt sowie die entsprechenden Modellvorhersagen. Die getesteten Kopfgugproben liegen für fast alle Versuchsreihen unterhalb der Modellvorhersage.

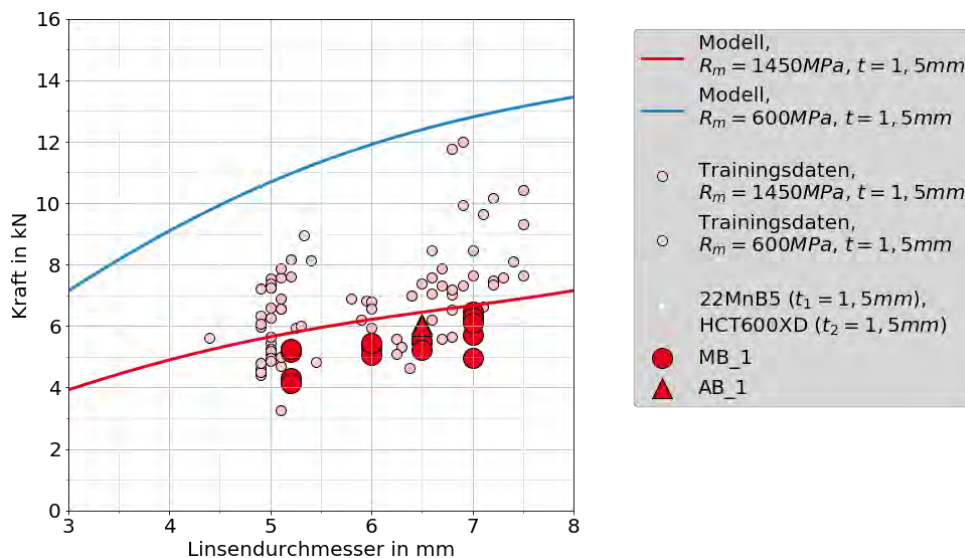


Bild 95
Modellvorhersagen für 22MnB5 mit 1,5 mm und für HCT600XD mit 1,5 mm im Vergleich zu experimentellen Daten der ungleichartigen Verbindung

In [Hui16] wurden Kreuzzugproben mit der Werkstoffkombination Usibor1500 (1,5 mm) und HCT600XD (1,5 mm) von ArcelorMittal dargestellt. Diese Verbindung ist vergleichbar mit der hier vorliegenden Verbindung aus 22MnB5 (1,5 mm) und HCT600XD (1,5 mm). Die Versuchsdaten werden in Bild 96 verglichen und der Modellvorhersage (rote Linie) gegenübergestellt. Die Versuchsreihen 1b-1, 1b-2, 1b-3 und 1b-7 liegen alle unterhalb der von dem Modell vorhergesagten Kraft. Die Versuchsdaten aus [Hui16] liegen alle überhalb der vorhergesagten Kraft.

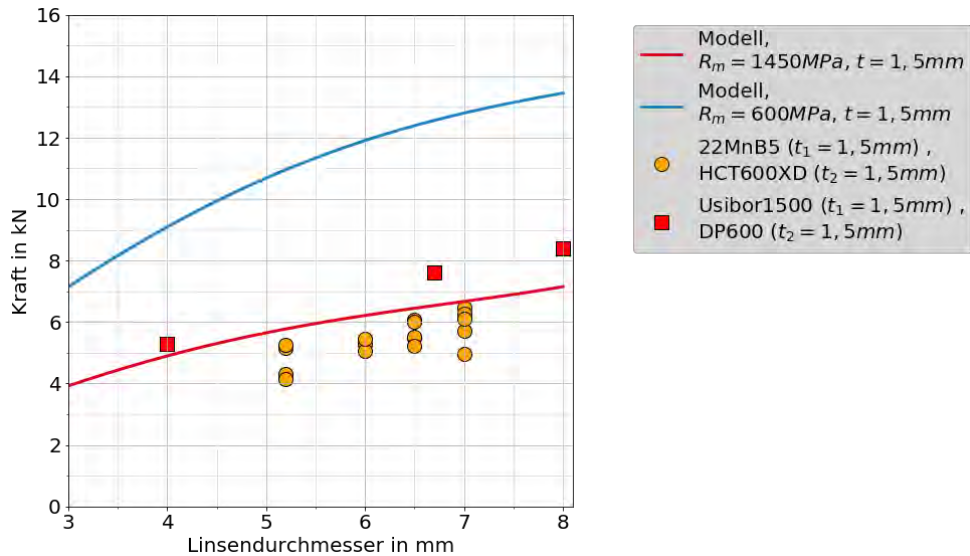


Bild 96
Modellvorhersagen für 22MnB5 mit 1,5 mm und für HCT600XD mit 1,5 mm im Vergleich zu experimentellen Daten der ungleichartigen Verbindung [Hui16]

Wie auch bei den Scherzugversuchen ist bei Verbindungen, die einen Fügepartner aus 22MnB5 haben eine hohe Streuung zu erkennen. Dies kann sowohl für gleichartige als auch für ungleichartige Verbindungen beobachtet werden.

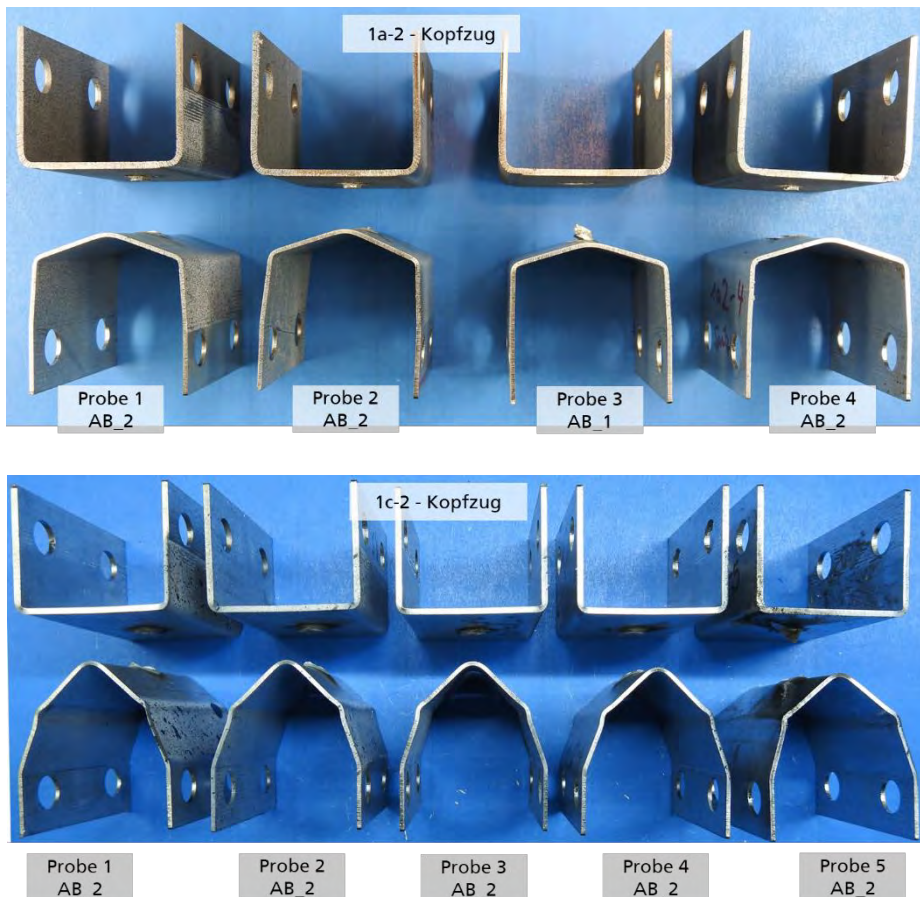


Bild 97
Probenbilder nach Versagen für die Reihe 1a-2
22MnB5 (1,5 mm) –
HCT780XD (1,0 mm) mit
dL = 5,8 mm und Reihe
1c-2 HCT780XD (1,5 mm)
– DC04 (1,0 mm) mit dL =
6,2 mm

In den Fällen, in denen das Versagen im dünneren Blech aufgetreten ist, konnte mit dem Regressionsmodell keine gute Vorhersage getroffen werden. Dies sind insbesondere die Versuchsreihen 1a-1, 1a-2, 1a-3 und alle Versuchsreihen 1c. Die Fügepartner verformen sich bei Belastung sehr unterschiedlich, dies hat einen erheblichen Einfluss auf die lokale Belastung der Fügestelle. Sobald ein Blech deutlich stärker verformt, ist die Belastung an der Fügestelle nicht mehr vergleichbar mit einer gleichartigen Verbindung. In einer gleichartigen Verbindung ist zu erwarten, dass sich beide Bleche gleichermaßen verformen. Dadurch ergibt sich ein anderer Belastungszustand an der Fügespaltwurzel. Die deutlich unterschiedliche Verformung ist in Bild 97 dargestellt.

Ver-suchs-reihe	R_{m1} [MPa]	t_1 [mm]	R_{m2} [MPa]	t_2 [mm]	d_L [mm]	$F_{max,1}$ [kN]	$F_{max,2}$ [kN]	$F_{max,pred}$ [kN]	$\bar{F}_{max,exp}$ [kN]	Δ [%]
1a-1	1450	1,5	800	1	5,1	5,7	6,6	5,7	3,9	-48
1a-2	1450	1,5	800	1	5,8	6,1	7,2	6,1	4	-53
1a-3	1450	1,5	800	1	5,4	5,9	6,9	5,9	4	-48
1a-4	1450	1,5	800	1,5	4,8	5,5	10	5,5	4,5	-24
1a-5	1450	1,5	800	1,5	5,4	5,9	10,8	5,9	5,3	-12
1a-6	1450	1,5	800	1,5	5,3	5,8	10,6	5,8	5,2	-12
1a-7	1450	1,5	800	2	5,3	5,8	13,6	5,8	5,7	-2
1a-8	1450	1,5	800	2	6,1	6,3	14,8	6,3	6,4	3
1a-9	1450	1,5	800	2	6	6,2	14,6	6,2	6,5	4
1a-10	1450	1,5	800	1,3	5	5,7	8,8	5,7	4,1	-37
1a-11	1450	1,5	800	1,3	5,9	6,2	9,8	6,2	4,9	-26
1a-12	1450	1,5	800	1,8	5,3	5,8	12,6	5,8	5,5	-6
1a-13	1450	1,5	800	1,8	6,2	6,3	13,7	6,3	6,1	-3
1a-14	1450	1,5	800	1,5	4,8	5,6	10,1	5,6	4,4	-25
1a-15	1450	1,5	800	1,5	5,8	6,1	11,2	6,1	5,1	-20
1b-1	1450	1,5	600	1,5	5,2	5,8	11	5,8	4,7	-22
1b-2	1450	1,5	600	1,5	7	6,7	12,8	6,7	5,9	-13
1b-3	1450	1,5	600	1,5	6,5	6,4	12,4	6,4	5,7	-14
1b-4	1450	1,5	1000	1,5	5,6	6	9,8	6	4,4	-36
1b-5	1450	1,5	1000	1,5	6	6,2	10,2	6,2	5,1	-23
1b-6	1450	1,5	1000	1,5	5,9	6,2	10,1	6,2	5,1	-21
1b-7	1450	1,5	600	1,5	6	6,2	11,9	6,2	5,3	-18
1b-8	1450	1,5	1000	1,5	5	5,7	9,2	5,7	4,8	-17
1c-1	800	1,5	290	1	3,6	8	4,1	4,1	2,5	-64
1c-2	800	1,5	290	1	6,2	11,6	6,3	6,3	4,6	-37
1c-3	800	1,5	290	1	5,8	11,2	6,1	6,1	4	-49
1c-4	800	1,5	290	1	5	10,3	5,5	5,5	3,3	-68
1c-5	800	1,5	290	1	6,4	11,8	6,4	6,4	4,9	-29

Tabelle 14 Vergleich von Modellvorhersagen Kopfzug und experimentellen Ergebnissen für ungleichartige Verbindungen (ohne Korrektur der markierten Reihen)

In Bild 98 sind die gebrochenen Proben für zwei weitere Reihen dargestellt, die jedoch nicht zur Korrektur berücksichtigt werden sollen. Hier ist wenig Deformation in den U-Profilen zu erkennen.

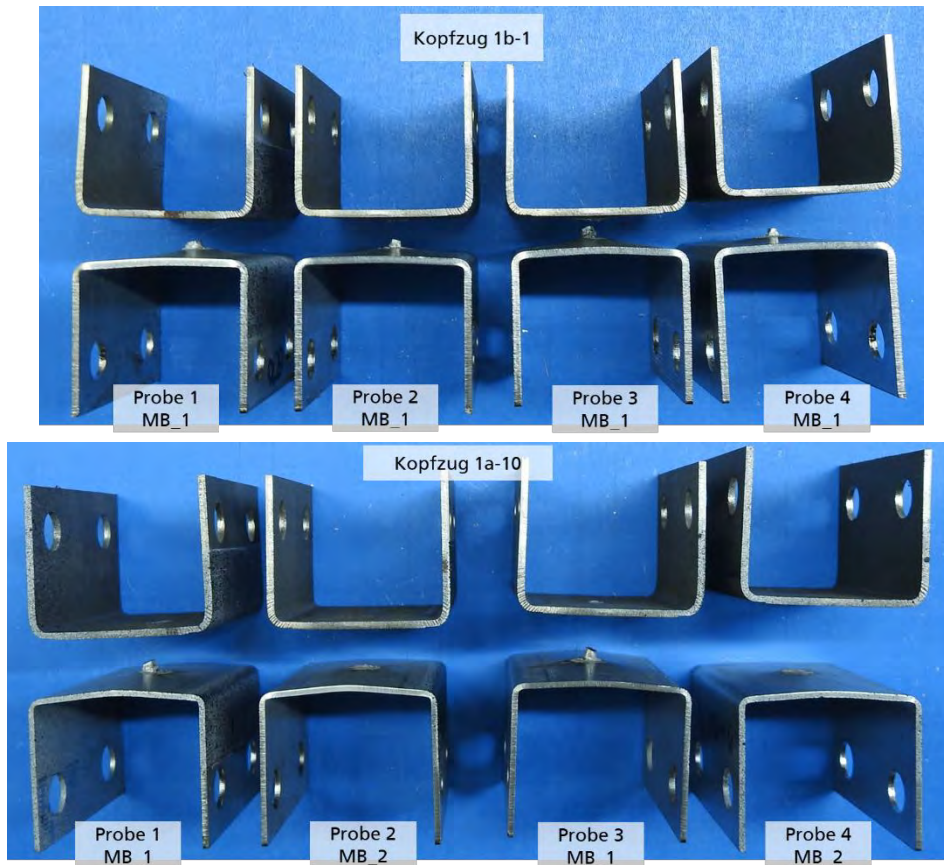


Bild 98
Probenbilder nach Versagen für die Reihe 1b-1
 22MnB5 (1,5 mm) – HCT600XD (1,5 mm) mit $d_L = 5,2 \text{ mm}$ und Reihe 1a-10 22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (1,3 mm) mit $d_L = 5,0 \text{ mm}$

4.6.4 Korrekturfaktor für ungleichartige Verbindungen mit deutlich unterschiedlichem Deformationsverhalten

In 4.6.3 wurde dargestellt, dass sich die Maximalkraft deutlich verringert, wenn die Fügepartner ein deutlich unterschiedliches Deformationsverhalten aufweisen. Um diesem Phänomen Rechnung zu tragen, soll ein Korrekturfaktor eingeführt werden. Dieser Korrekturfaktor basiert auf den experimentellen Daten der hier untersuchten ungleichartigen Verbindungen. In der Datenbank wurde in der Regel nicht angegeben, welcher Fügepartner bei einer ungleichartigen Verbindung versagt hat.

$$\varphi = \begin{cases} 2/3, & V < 0,3 \\ 1, & V \geq 0,3 \end{cases} \quad \text{mit } V = \frac{\min[R_{m1} \cdot t_1^2, R_{m2} \cdot t_2^2]}{\max[R_{m1} \cdot t_1^2, R_{m2} \cdot t_2^2]} \quad (5)$$

Es wird der Korrekturfaktor φ eingeführt. Dieser soll nur auf solche Verbindungen angewendet werden, die aufgrund ihres unterschiedlichen Versagensverhaltens eine Belastung an der Fügewurzel erfahren, die einer beidseitigen Schälbelastung nahekommt. Diese Verbindungen werden über das Verhältnis V identifiziert. Dazu wird das Deformationsvermögen aus Produkt von Zugfestigkeit und der Blechdicke im Quadrat beschrieben. Das Deformationsvermögen wird für beide Fügepartner berechnet und daraus das Verhältnis gebildet. Es wird die Formel (5) verwendet.

In der Reihe 1a-1 ($d_L = 5,1 \text{ mm}$) haben aus insgesamt vier Wiederholungen zwei Wiederholversuche über Ausknöpfen und zwei Wiederholversuche über Mischbruch aus dem unteren Blech (HCT780XD 1,0 mm) versagt. In Reihe 1a-2 ($d_L = 5,8 \text{ mm}$) wiesen drei von vier Wiederholversuchen und in Reihe 1a-3 ($d_L = 5,4 \text{ mm}$) zwei von vier Wie-

derholversuchen ein Ausknöpfen aus dem unteren Blech auf. Für diese Materialkombination ist kein eindeutiger Zusammenhang zu erkennen, dass der Linsendurchmesser ein zusätzlicher Parameter ist. Bei der Kombination 22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (1,3 mm) ist nur bei zwei Wiederholversuchen ein Mischbruch mit Versagen im dünnen Blech aufgetreten. Für diese Reihen mit diesem Verhältnis soll daher keine Korrektur angewendet werden. Für alle Versuchsreihen 1c (HCT780XD $t_1 = 1,5 \text{ mm}$ und DC04 $t_2 = 1,0 \text{ mm}$) ist $V = 0,161$. In dieser Versuchsreihe sind alle Versuche im dünneren Blech ausgeknöpft. Das Verhältnis V beträgt für die Versuchsreihen 1a-1, 1a-2 und 1a-4 den Wert 0,245. Für die Reihe 1a-10 und 1a-11 (22MnB5 $t_1 = 1,5 \text{ mm}$ und HCT780XD $t_2 = 1,3 \text{ mm}$) liegt der Wert bei $V = 0,414$. Für die Reihen 1b-1, 1b-2, 1b-3 und 1b-7, d.h. den Reihen mit 22MnB5 $t_1 = 1,5 \text{ mm}$ und HCT600XD $t_2 = 1,5 \text{ mm}$ ist $V = 0,414$; hier ist in keiner Reihe ein Versagen im „schwächeren“ Blech aufgetreten. Aufgrund dieser vier Materialkombinationen wird als Grenze $V < 0,3$ festgelegt. Der Korrekturwert wurde als Mittelwert berechnet aus den Materialkombinationen mit $t_2 = 1,0 \text{ mm}$. Für die betroffenen Reihen aus 1a beträgt der mittlere Korrekturfaktor 0,656, für die Versuchsreihen aus 1c beträgt der mittlere Korrekturfaktor 0,677. Zur Vereinfachung wird ein einheitlicher Korrekturfaktor von $\phi = 2/3$ gewählt. Die korrigierten Werte für die Versuchsreihen mit $V < 0,3$ sind in Tabelle 15 zu finden.

Ver-suchs-reihe	R_{m1} [MPa]	t_1 [mm]	R_{m2} [MPa]	t_2 [mm]	d_L [mm]	$F_{max,1}$ [kN]	$F_{max,2}$ [kN]	$F_{max,pred}$ [kN]	$\bar{F}_{max,exp}$ [kN]	Δ [%]
1a-1	1450	1,5	800	1	5,1	5,7	6,6	3,8	3,9	1,6
1a-2	1450	1,5	800	1	5,8	6,1	7,2	4,1	4	-1,4
1a-3	1450	1,5	800	1	5,4	5,9	6,9	3,9	3,7	-5,8
1c-1	800	1,5	290	1	3,6	8	4,1	2,7	2,5	-9,3
1c-2	800	1,5	290	1	6,2	11,6	6,3	4,2	4,6	8,7
1c-3	800	1,5	290	1	5,8	11,2	6,1	4	4	0,4
1c-4	800	1,5	290	1	5	10,3	5,5	3,7	3,3	-11,7
1c-5	800	1,5	290	1	6,4	11,8	6,4	4,2	4,9	14

Tabelle 15 Vergleich der korrigierten Modellvorhersagen Kopfzug und experimentellen Ergebnissen für ungleichartige Verbindungen mit $V < 0,3$ nach Korrektur mit $\phi = 2/3$

Die Abweichung nach der Korrektur liegt in den Reihen 1c zwischen +14,0% und -11,7%. Für die Reihen 1a-1, 1a-2 und 1a-3 liegt die Abweichung jetzt zwischen +1,6% und -9,3%.

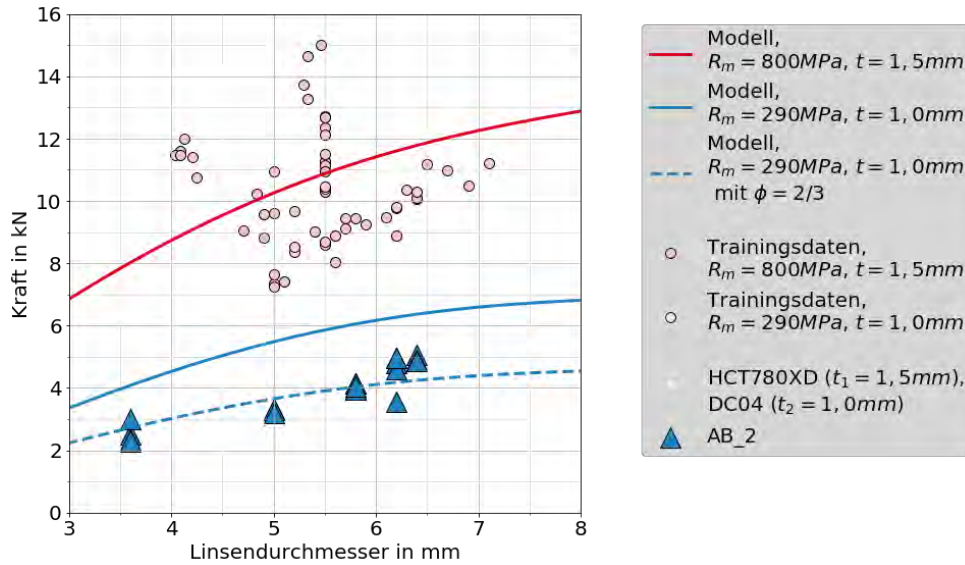


Bild 99
Modellvorhersagen für HCT780XD mit 1,5 mm und für DC04 mit 1,0 mm im Vergleich zu experimentellen Daten der ungleichartigen Verbindung

Nach Anwendung des Korrekturfaktors wird mit der Modellvorhersage eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der ungleichartigen Verbindung der Versuchsreihe 1c erreicht (siehe Bild 99). Die korrigierte Vorhersage ist mit der gestrichelten blauen Linie dargestellt.

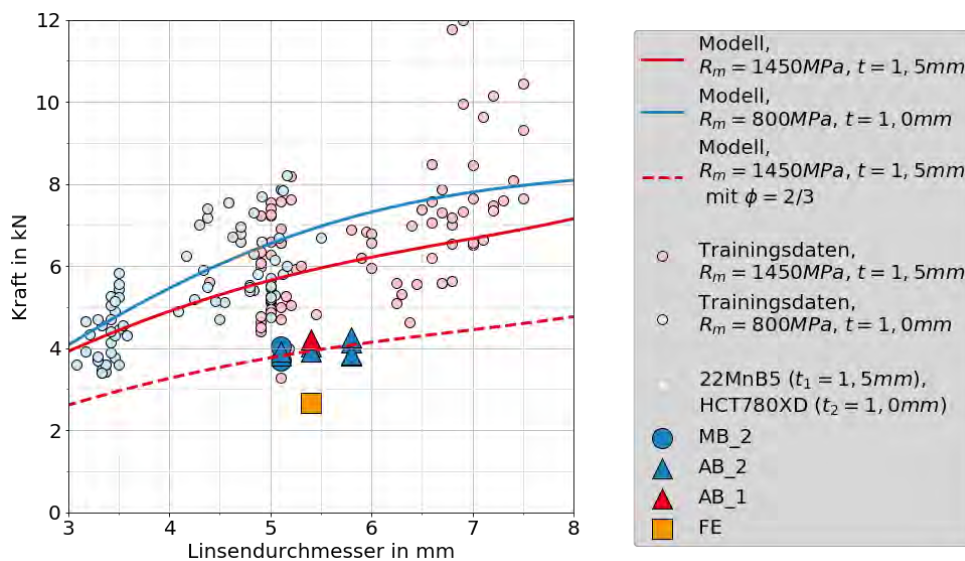


Bild 100
Modellvorhersagen für 22MnB5 mit 1,5 mm und für HCT780XD mit 1,0 mm im Vergleich zu experimentellen Daten der ungleichartigen Verbindung

In Bild 100 ist zu erkennen, dass das Modell eine gute Anpassung an die Trainingsdaten zeigt. Die gestrichelte Linie ist die Vorhersage nach Anwendung des Korrekturfaktors. Diese korrigierte Vorhersage liegt nun deutlich niedriger als die Trainingsdaten, zeigt jedoch eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten. Die durchgezogenen Linien dienen zur Vorhersage der gleichartigen Verbindungen, die gestrichelte Linie dient zur Vorhersage der ungleichartigen Verbindung.

4.7 Schälzug-Modell

Die gleichen Schrittweiten für die Rastermittlung wurden im Vergleich zu Scherzug und Kopfzug leicht angepasst ($\Delta d_L = 0,4 \text{ mm}$, $\Delta t = 0,1 \text{ mm}$ und $\Delta R_m = 50 \text{ MPa}$). Auch hier wurde der Programmablauf aus 4.2.4 für die *random_seed* Werte 1 bis 20 wiederholt. Die Ergebnissen für die Hyperparameteroptimierung tendierten zum Polynomgrad $n = 3$. Anschließend wurde der Programmablauf erneut wiederholt. Diesmal wurde der Polynomgrad $n = 3$ festgehalten und nur der Regularisierungsfaktor λ in der Kreuzvalidierung gesucht. Die Suche ergab einen Wert von $\lambda = 0,00010812$. Anschließend wurde Ridge Regression Verfahren mit diesen Parametern durchgeführt auf eine der Test-/Trainingsteilungen, für welche dieses λ gewählt wurde. Das resultierende Bestimmtheitsmaß liegt bei 0,6308.

4.7.1 Datenauswahl

Für die Erstellung des Schälzug-Modells wurden KS2-Sa Proben verwendet. Bei diesen Probenformen ergibt sich eine nahezu identische Belastungssituation an der Fügespaltwurzel. Für die gleiche Verbindung werden daher vergleichbare Maximalkräfte erreicht. Insgesamt werden 347 Daten aus der Datenbank gefiltert. Davon werden 20% als Testdaten (70) herangezogen und die restlichen 277 Daten sind Trainingsdaten. Den Trainingsdaten wurden zusätzlich künstliche Daten zugeordnet. Für die untere Grenze sind es 64 Datenpunkte. Es wurden nur Randwerte für $d_L = 0,4 \text{ mm}$, $\Delta t = 0,1 \text{ mm}$ und $\Delta R_m = 50 \text{ MPa}$ definiert. Da nur wenige Daten für kleine und große Linsendurchmesser vorhanden waren, wurden die Daten zusätzlich wie folgt ergänzt. Es wurden in jeder Rasterzelle innerhalb einer Zeile ($\Delta t, \Delta R_m$) das Ergebnis für den kleinsten Linsendurchmesser ermittelt. Handelte es sich um einen Linsendurchmesser mit $d_L \leq 4 \text{ mm}$ wurde die Maximalkraft auf $d_L = 2 \text{ mm}$ kopiert. Weiterhin wurde innerhalb einer Zeile ($\Delta t, \Delta R_m$) das Ergebnis für den größten Linsendurchmesser ermittelt. Wenn es sich um einen Datenpunkt mit $d_L \geq 6 \text{ mm}$ handelte, wurde diese Maximalkraft auf $d_L = 9 \text{ mm}$ kopiert. So wurden für $d_L = 2 \text{ mm}$ zusätzlich 37 Datenpunkte ergänzt. Für $d_L = 9 \text{ mm}$ wurden 26 Datenpunkte ergänzt. Durch dieses Vorgehen sollen Überschwinger am Rand verhindert werden. Nach Rastermittlung und Ergänzung mit Randwerten sind 199 Datenpunkte vorhanden.

In Bild 100 ist die Aufteilung des Datensatzes in Trainingsdaten (Dunkelblau), künstliche Trainingsdaten (Hellblau) und Testdaten (Orange) dargestellt.

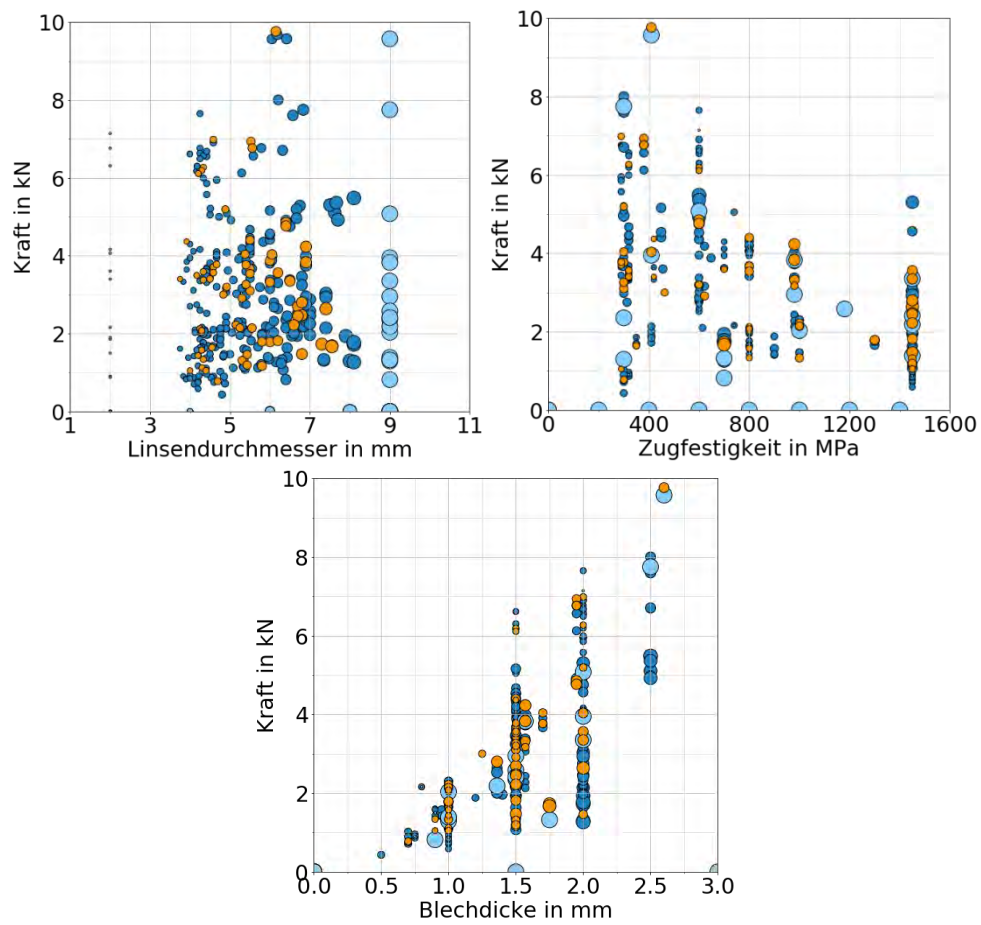


Bild 101
Verwendete Trainings- und Testdaten mit zusätzlichen künstlichen Randwerten

- Training
- Training (künstliche Daten)
- Test

4.7.2 Plausibilitätsanalyse

In Bild 102 ist das Modell für vier unterschiedliche konstante Zugfestigkeiten dargestellt. Insgesamt ist zu erkennen, dass im Vergleich zu den Kopfzugmodellen und insbesondere den Scherzugmodellen deutlich kleinere Maximalkräfte vorhergesagt werden. Die einzelnen Kurven stellen die Vorhersagen der Kraft über den Linsendurchmesser für eine konstante Blechdicke dar. In Blau ist die kleinste Blechdicke mit $t = 0,75 \text{ mm}$ dargestellt, in Rot die Blechdicke $t = 1,0 \text{ mm}$, in Orange die Blechdicke $t = 1,5 \text{ mm}$ und in Grün die größte Blechdicke mit $t = 2,0 \text{ mm}$. Die vorhergesagten Kräfte für die Zugfestigkeit $R_m = 1500 \text{ MPa}$ sind am niedrigsten, die vorhergesagten Kräfte für die Zugfestigkeit $R_m = 600 \text{ MPa}$ sind am höchsten bei anderweitig festgehaltenen Größen. Für Blechdicken mit $t \leq 1,5 \text{ mm}$ sind die Maximalkräfte für $R_m = 300 \text{ MPa}$ und $R_m = 600 \text{ MPa}$ sehr ähnlich. Für Blechdicken $t \leq 1,0 \text{ mm}$ zeigen die Kurven ab einem Linsendurchmesser von ca. 6 mm einen leichten Abfall.

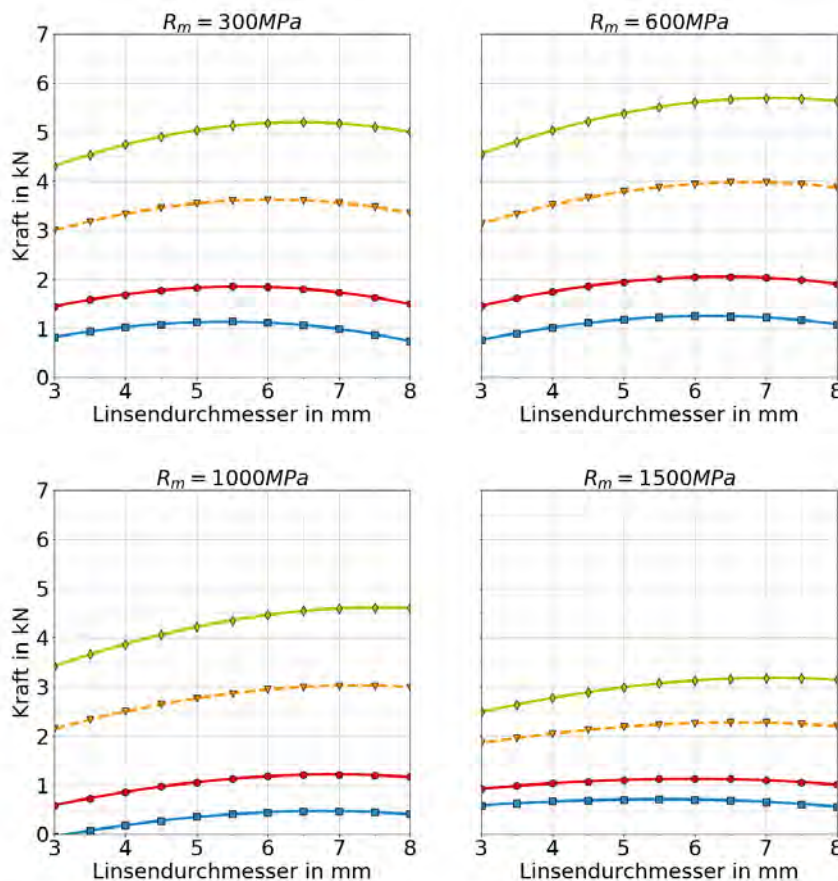
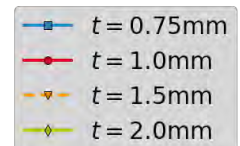


Bild 102
Darstellung der Modellvorhersagen für unterschiedliche Blechdicke bei konstanter Zugfestigkeit



In der Darstellung von Bild 103 ist noch deutlicher zu erkennen, dass die beiden niedrigsten Zugfestigkeiten die höchsten Maximalkräfte vorhersagen. Dabei sind die Maximalkräfte für $t \leq 1,5 \text{ mm}$ für Zugfestigkeit 600 MPa etwas höher als für 300 MPa. Für die Blechdicken $t \leq 1,0 \text{ mm}$ sind die Maximalkräfte für $R_m = 600 \text{ MPa}$ und 300 MPa für kleine Linsendurchmesser identisch. Ab einem Linsendurchmesser von ca. 6 mm sinkt die vorhergesagte Maximalkraft bei $R_m = 300 \text{ MPa}$ schneller ab als für $R_m = 600 \text{ MPa}$.

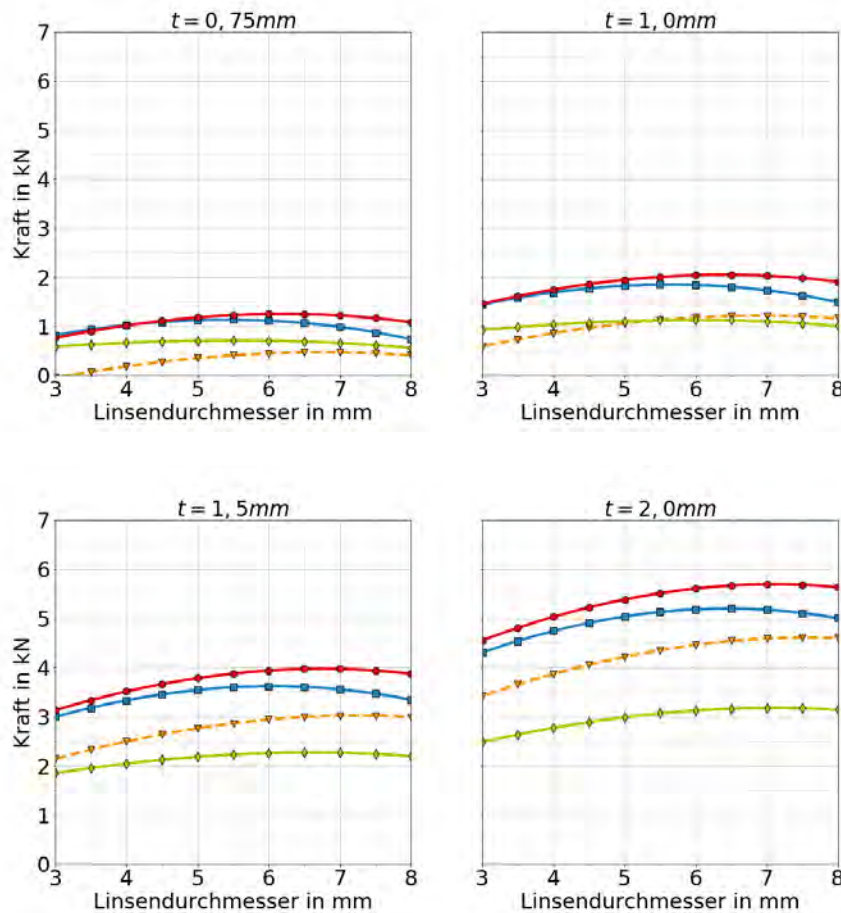


Bild 103
Darstellung der Modellvorhersagen für unterschiedliche Blechdicke bei konstanter Zugfestigkeit



In Bild 104 werden experimentelle Ergebnisse für gleichartige Verbindungen aus der Datenbank im Vergleich zu den Modellvorhersagen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Streuung der experimentellen Daten sehr hoch ist.

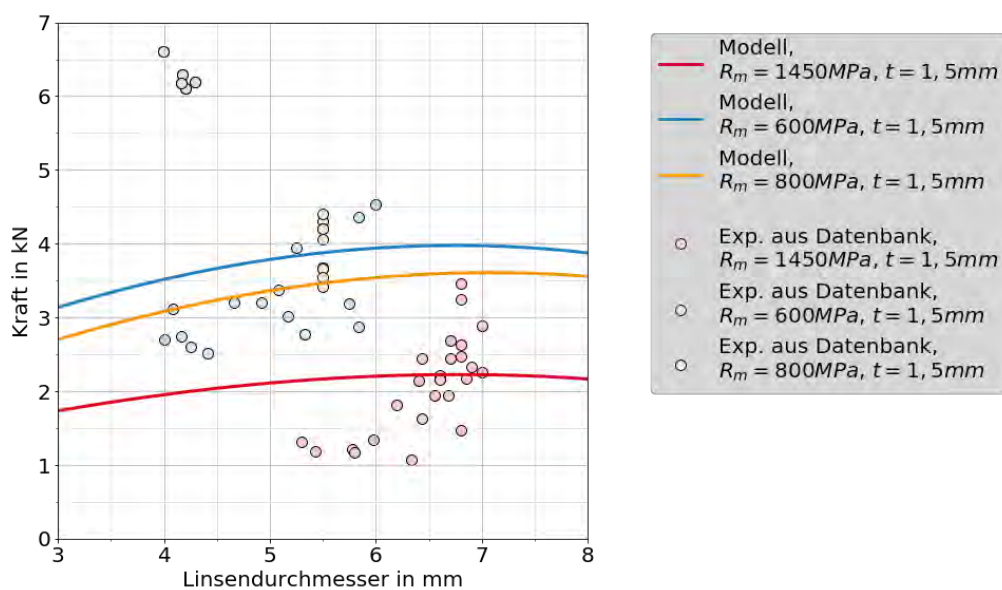


Bild 104
Darstellung der Modellvorhersagen bei konstanter Blechdicke bei unterschiedlichen Zugfestigkeiten im Vergleich zu experimentellen Ergebnissen

4.7.3 Korrekturfaktor für ungleichartige Verbindungen unter Schälzugbelastung

Wie in 4.6.3 bereits für Kopfzugproben dargestellt wurde, führt auch bei Schälzugproben ein deutlicher Unterschied in Blechdicke und Zugfestigkeit zwischen den beiden Fügepartnern zu einem sehr unterschiedlichen Deformationsverhalten. Dadurch ändert sich die Belastungssituation an der Fügespaltwurzel im Vergleich zu einer gleichartigen Verbindung der jeweiligen Fügepartner. In Bild 105 sind beispielhaft die deformierten Proben nach Bruch für die beiden Versuchsreihen 1a-2 und 1c-2 dargestellt. In beiden Fällen ist zu erkennen, dass das obere Blech (22MnB5 1,5 mm für 1a-2 und HCT780XD 1,5 mm für 1c-2) kaum Deformation aufweist. Das untere Blech hingegen (HCT780XD 1,0 mm für 1a-2 und DC04 1,0 mm für 1c-2) ist deutlich deformiert.

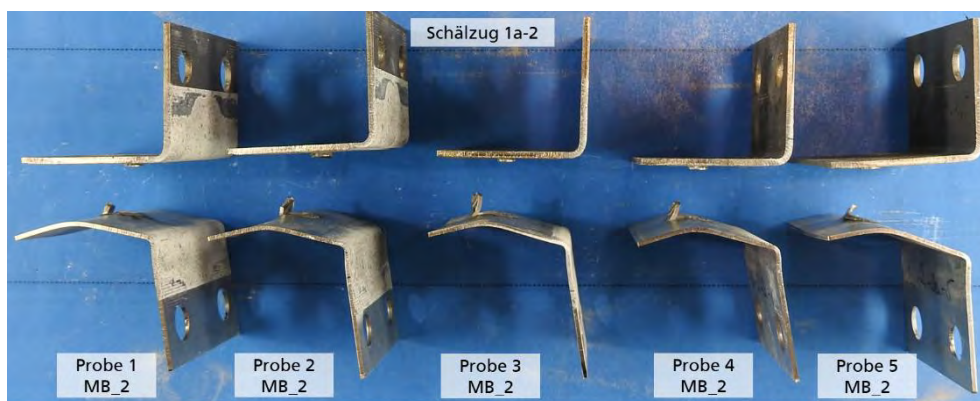
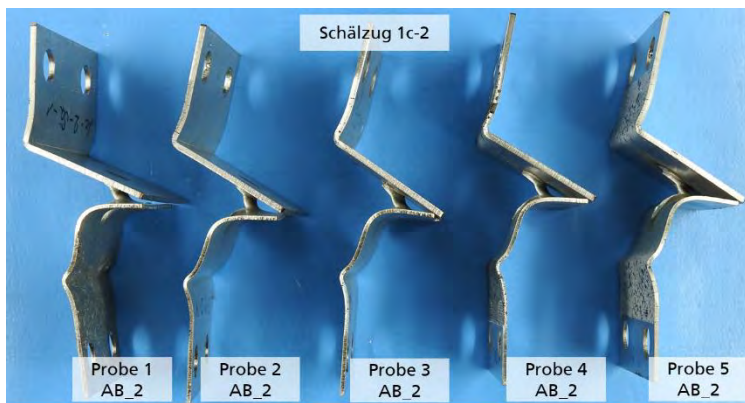


Bild 105
Probenbilder nach Versagen für die Reihe 1a-2 22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (1,0 mm) mit $dL = 5,8$ mm und Reihe 1c-2 HCT780XD (1,5 mm) – DC04 (1,0 mm) mit $dL = 6,2$ mm



Es soll eine Korrekturfunktion eingeführt werden, die die Vorhersage für gleichartige Verbindungen korrigiert, um den Unterschied durch das unterschiedliche Deformationsverhalten bei ungleichartigen Verbindungen zu berücksichtigen. Die Korrekturfunktion wird anhand der experimentellen Daten für die 26 untersuchten ungleichartigen Materialkombinationen, bestimmt.

Die Korrekturfunktion soll nur von Zugfestigkeit und Blechdicke abhängen. Der Einfluss des Linsendurchmessers auf das Deformationsverhalten und die veränderte Belastungsfunktion am Fügespalt ist vernachlässigbar. Zur Ermittlung der Funktion wird für jede Versuchsreihe die Maximalkraft vorhergesagt mit $F_{max,pred} = \min(F_{max,pred,1}, F_{max,pred,2})$. Anschließend wird die notwendige Korrektur pro Ver-

suchsreihe ermittelt mit $F_{max,exp}/F_{max,pred}$. Die experimentellen Daten werden in Blechdicken-/Zugfestigkeitskombinationen gruppiert. Insgesamt handelt es sich um acht Kombinationen. Für jede dieser Kombinationsreihen wurde der Mittelwert der Korrektur gebildet. Die Versuchsreihen 1a-4, 1a-7, 1a-14 und 1b-1 wurden nicht in den jeweiligen Gruppen berücksichtigt. Hier wurden sehr hohe Schwankungen beobachtet (Kapitel 3.4).

Das Verhältnis V zur Beschreibung des unterschiedlichen Deformationsverhaltens der beiden Fügepartner wird berechnet mit $V = \min[R_{m1} \cdot t_1^2, R_{m2} \cdot t_2^2] / \max[R_{m1} \cdot t_1^2, R_{m2} \cdot t_2^2]$.

Das Verhältnis V und die Korrektur sind in Bild 106 gegeneinander geplottet. Es ist zu erkennen, dass sich für die Materialkombination 22MnB5-HCT780XD die Gruppen aufsteigend nach Blechdicke von links nach rechts aufreihen. Desto größer das Verhältnis V , desto kleiner ist der Unterschied im Deformationsverhalten. Die Kombination 22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (1,3 mm) hat ein ähnliches Verhältnis V wie die Kombination 22MnB5 (1,5 mm) – HCT600XD (1,5 mm). Die notwendige Korrektur ist für die Kombination mit HCT600XD jedoch deutlich höher. Das kleinste Verhältnis V hat die Kombination HCT780XD (1,5 mm) – DC04 (1,0 mm).

Es wurde eine Ausgleichsgerade angepasst. Da es sich nur um acht Punkte handelt wurde eine gewöhnliche Least Square Anpassung angewendet.

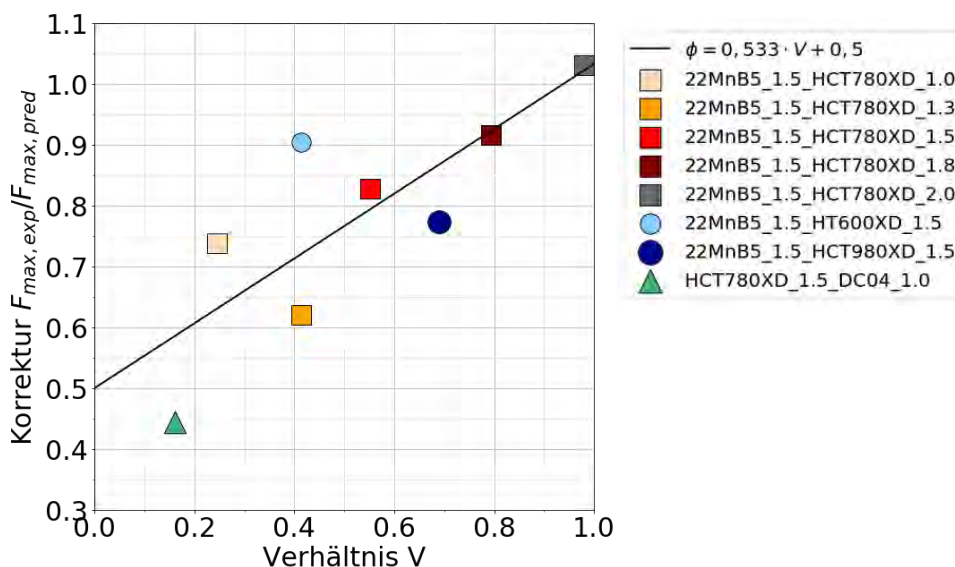


Bild 106
Korrekturfunktion für
verschiedene Blechdi-
cken-/Zugfestigkeitskom-
binationen

Als Korrekturfunktion konnte damit Gleichung (6) ermittelt werden.

$$\phi = 0,533 \cdot V + 0,5 \quad \text{mit } V = \frac{\min[R_{m1} \cdot t_1^2, R_{m2} \cdot t_2^2]}{\max[R_{m1} \cdot t_1^2, R_{m2} \cdot t_2^2]} \quad (6)$$

4.7.4 Übertragung auf ungleichartige Verbindungen

In Bild 107 ist die Modellvorhersage für die ungleichartige Verbindung mit der Kombination 22MnB5 (1,5 mm) und HCT780XD (2,0 mm). Es wird eine gute Übereinstimmung mit der Modellvorhersage getroffen. Dies trifft zu, obwohl für die Zugfestigkeit 1450 MPa mit Blechdicke 1,5 mm keine Proben mit Linsendurchmesser kleiner 5 mm vorhanden sind. Bei dieser Kombination ergibt sich ein Korrekturfaktor $\varphi = 1,02$. Die Maximalkraft der ungleichartigen Verbindung ist also fast identisch mit der einer gleichartigen Verbindung mit 22MnB5 (1,5 mm).

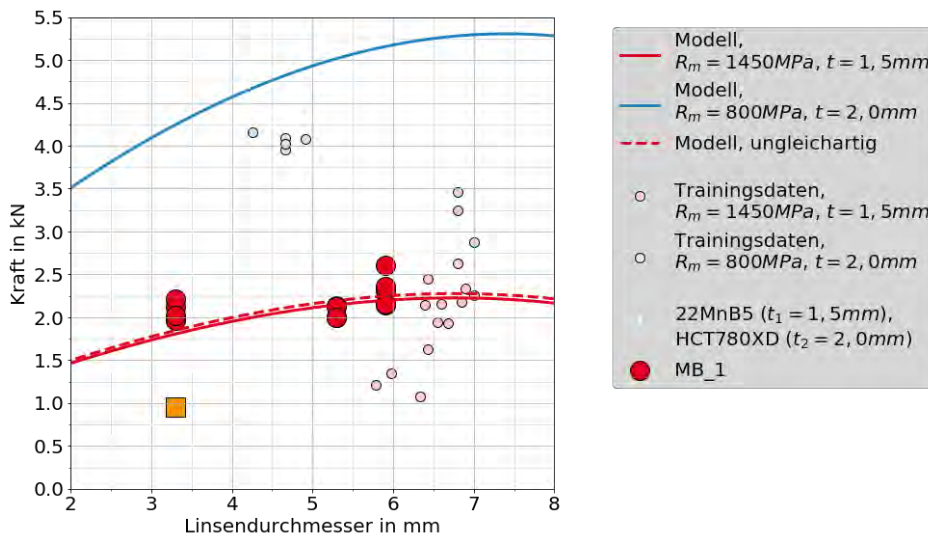


Bild 107
Modellvorhersagen für 22MnB5 mit 1,5 mm und für HCT780XD mit 2,0 mm im Vergleich zu experimentellen Daten der ungleichartigen Verbindung

Die Ergebnisse aus Versuchsreihe 1a mit der Kombination 22MnB5 (1,5 mm) zu HCT780XD (1,5 mm) sind in Bild 108 dargestellt. Der Verlauf der Kurve der Vorhersage ist sehr flach im Gegensatz zu den experimentellen Ergebnissen. Hier steigen die Maximalkräfte mit steigendem Linsendurchmesser deutlich schneller an. Möglicherweise ließe sich die Vorhersagequalität verbessern, indem die künstlichen Randwerte mit $F_{max} = 0$ nicht bei $d_L = 0$ sondern für größere Linsendurchmesser eingefügt werden.

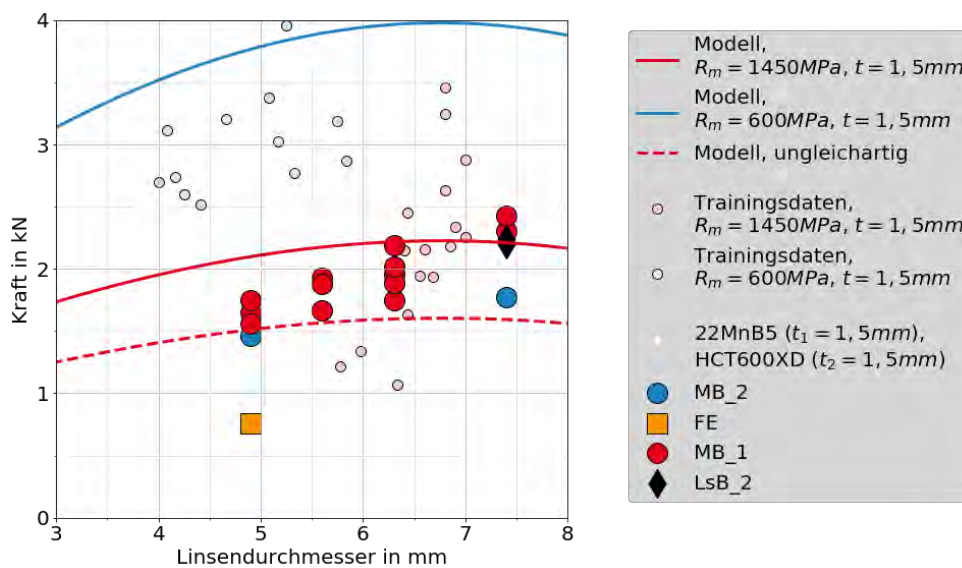


Bild 108
Modellvorhersagen für 22MnB5 mit 1,5 mm und für HCT600XD mit 1,5 mm im Vergleich zu experimentellen Daten der ungleichartigen Verbindung

Für die Kombination 22MnB5 (1,5 mm) zu HCT600XD (1,5 mm) gab es nur wenig Variation im Linsendurchmesser (Bild 109). Die Vorhersage nach Korrektur ist etwas niedriger als die experimentell ermittelten Maximalkräfte. Der Korrekturfaktor für diese Kombination beträgt $\varphi = 0,721$.

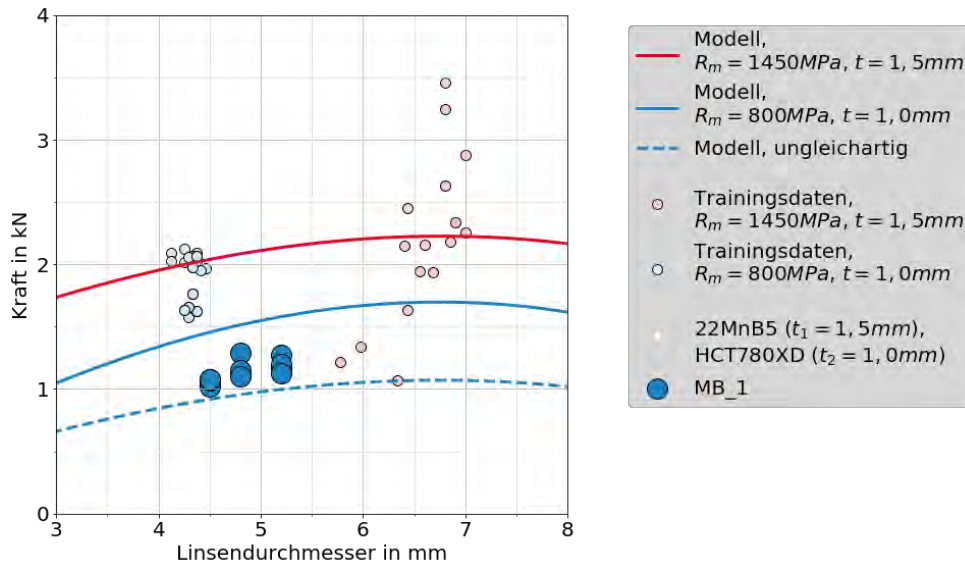


Bild 109
 Modellvorhersagen für 22MnB5 mit 1,5 mm und für HCT780XD mit 1,5 mm im und experimentelle Daten der ungleichartigen Verbindung

Das kleinste Verhältnis V hat die Kombination HCT780XD (1,5 mm) – DC01 (1,0 mm). Der Vergleich der vorhergesagten Maximalkräfte und experimentellen Ergebnisse ist in Bild 110 dargestellt. Die Vorhersage zeigt eine gute Übereinstimmung. Der Kurvenverlauf zeigt jedoch einen Abfall der Maximalkraft für steigende Linsendurchmesser.

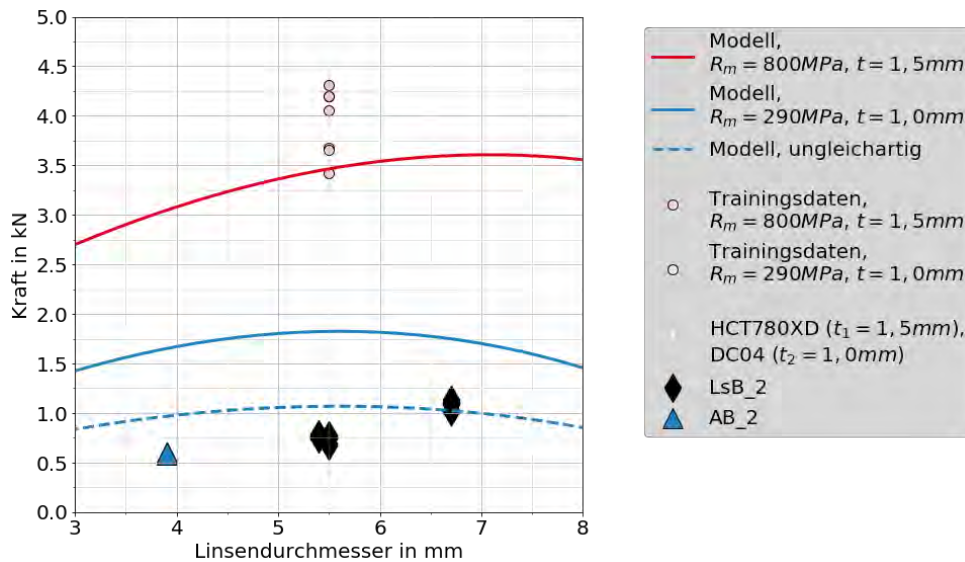


Bild 110
 Modellvorhersagen für HCT780XD mit 1,5 mm und für DC04 mit 1,0 mm im Vergleich zu experimentellen Daten der ungleichartigen Verbindung

In Tabelle 16 sind die Ergebnisse der Vorhersage aufgeführt. Während die prozentualen Abweichungen Δ hoch sind, haben nur zwei Vorhersagen eine absolute Abweichung Δ_{abs} größer 0,5 kN.

Ver-suchs-reihe	R_{m1} [MPa]	t_1 [mm]	R_{m2} [MPa]	t_2 [mm]	d_L [mm]	$F_{max,1}$ [kN]	$F_{max,2}$ [kN]	$F_{max,pred}$ [kN]	$\bar{F}_{max,exp}$ [kN]	Δ [%]	Δ_{abs} [kN]
1a-1	1450	1,5	800	1	4,5	2,04	1,45	0,92	1,06	14	0,15
1a-2	1450	1,5	800	1	5,2	2,13	1,58	1	1,18	16	0,19
1a-3	1450	1,5	800	1	4,8	2,08	1,51	0,95	1,17	18	0,21
1a-4	1450	1,5	800	1,5	4,4	2,02	3,21	1,61	0,81	-98	-0,79
1a-5	1450	1,5	800	1,5	6,6	2,22	3,59	1,77	1,82	3	0,05
1a-6	1450	1,5	800	1,5	5,5	2,17	3,46	1,72	1,71	0	-0,01
1a-7	1450	1,5	800	2	3,3	1,81	4,24	1,85	1,85	0	0,01
1a-8	1450	1,5	800	2	5,9	2,2	5,16	2,25	2,32	3	0,07
1a-9	1450	1,5	800	2	5,3	2,15	5,02	2,19	2,06	-6	-0,13
1a-10	1450	1,5	800	1,3	4,4	2,02	2,48	1,46	1,28	-14	-0,18
1a-11	1450	1,5	800	1,3	5,9	2,2	2,77	1,58	1,33	-19	-0,25
1a-12	1450	1,5	800	1,8	5,9	2,2	4,58	2,03	1,96	-3	-0,06
1a-13	1450	1,5	800	1,8	6,6	2,22	4,67	2,05	2,08	1	0,03
1a-14	1450	1,5	800	1,5	4,7	2,07	3,29	1,64	1,25	-32	-0,4
1a-15	1450	1,5	800	1,5	5,2	2,13	3,41	1,69	1,87	9	0,17
1b-1	1450	1,5	600	1,5	4,9	2,1	3,76	1,51	1,44	-5	-0,08
1b-2	1450	1,5	600	1,5	7,4	2,21	3,95	1,59	2,19	27	0,6
1b-3	1450	1,5	600	1,5	6,3	2,22	3,96	1,6	1,96	18	0,36
1b-4	1450	1,5	1000	1,5	5,4	2,16	2,85	1,87	1,57	-19	-0,3
1b-5	1450	1,5	1000	1,5	6,2	2,21	2,97	1,92	1,77	-9	-0,15
1b-6	1450	1,5	1000	1,5	5,9	2,2	2,93	1,91	1,74	-9	-0,16
1b-7	1450	1,5	600	1,5	5,6	2,17	3,89	1,57	1,83	14	0,26
1c-2	800	1,5	290	1	6,7	3,6	1,75	1,02	1,07	4	0,05
1c-3	800	1,5	290	1	5,5	3,46	1,82	1,07	0,72	-48	-0,34
1c-4	800	1,5	290	1	3,9	3,05	1,65	0,97	0,59	-63	-0,37
1c-5	800	1,5	290	1	5,4	3,45	1,82	1,07	0,76	-40	-0,3

Tabelle 16 Vergleich von Modellvorhersagen Schälzug und experimentellen Ergebnissen für ungleichartige Verbindungen

In Kapitel 3.4 wurde bereits auf die hohe Streuungen in Reihe 1a-4 (Bild 36), Reihe 1a-7 (Bild 40), Reihe 1a-14 (Bild 37) und Reihe 1b-1 (Bild 42) hingewiesen. Die hohen Schwankungen sind auf die unterschiedlichen Bruchbilder zurückzuführen. Das Vorhersagemodell ist näher an den Vorhersagen für das hohe Kraftniveau, welches bei Mischbruch auftritt (Tabelle 17). Daher kommt es für Reihe 1a-4 zu einer sehr großen prozentualen Abweichung von 98 % für die durchschnittliche Maximalkraft dieser Versuchsreihe. Die absolute Abweichung liegt bei -0,79 kN. Dies ist auch die größte absolute Abweichung für die Schälzug Versuchsreihen.

	Maximal- kraft (Vorher- sage) [kN]	Niedriges Kraftniveau (Exp.) [kN]	Δ [%]	Hohes Kraftniveau (Exp.) [kN]	Δ [%]
1a-4 $d_L = 3,6 \sqrt{t_{min}}$	0,81	Probe 1,3, 4, 5 0,66	143	Probe 2 1,42	13
1a-7 $d_L = 2,7 \sqrt{t_{min}}$	1,85	Probe 3 0,95	94	Probe 1, 2, 4, 5 2,08	-13
1a-14 $d_L = 3,8 \sqrt{t_{min}}$	1,25	Probe 2 0,93	77	Probe 1,3 1,41	17
1b-1 $d_L = 4,0 \sqrt{t_{min}}$	1,44	Probe 2 0,76	99	Probe 1,3, 4, 5 1,61	-5,8

Tabelle 17 Abweichungen experimentelle Ergebnisse und Vorhersage für unterschiedliche Kraftniveaus ausgesuchter Versuchsreihen

5 Zusammenfassung

In diesem Projekt wurden punktgeschweißte Proben einer umfangreichen Versuchsmatrix geprüft, um Einflussfaktoren wie Linsendurchmesser, Blechdicke und Stahleigenschaften auf die Tragfähigkeit bei ungleichartigen Verbindungen unter Kopfzug-, Scherzug- und Schälzugbelastung zu untersuchen. Ungleichartig bedeutet hier, dass unterschiedliche Stähle in unterschiedlichen Blechdicken geschweißt wurden. Die Versuchsmatrix umfasst hauptsächlich Zweiblech-, aber auch zwei Dreiblechverbindungen.

Die Stahlblechkombinationen wurden so gewählt, wie sie typischerweise in der Automobilindustrie verwendet werden. Bei Punktschweißverbindungen mit 22MnB5 zeigte sich, dass dieser maßgebend für die Bruchauslösung ist. Die Beteiligung von 22MnB5 führt zu einer Mischbruchneigung (anteilige Bruchfläche in der Fügeebene) unter Normalbelastung, also hier in Kopfzug- und Schälzugversuchen. Trotz der hohen Zugfestigkeit von 22MnB5 ist der Versagensort auch bei Paarungen mit niederfesteren Fügepartnern der gleichen Blechdicke im 22MnB5 Blech. Häufig trat auch ein Versagen in beiden Blechen auf, d.h. ein Herausschälen oder Ausknöpfen des Schweißpunkts aus beiden Blechen. Die Maximalkräfte zeigen keine signifikanten Unterschiede, wenn innerhalb einer Versuchsreihe einseitiges oder beidseitiges Herausschälen bzw. Ausknöpfen auftrat, da dies sequentielle Bruchereignisse sind.

Unter Scherzugbelastung wird ein linearer Anstieg der Maximalkraft über den Linsendurchmesser beobachtet. Die Maximalkraft steigt außerdem mit der Blechdicke des zweiten Fügepartners an. Der Unterschied zwischen den Maximalkräften bei einer Blechdicke von 1,8 mm und 2,0 mm war bei gleichem Linsendurchmesser bis $d_L = 7 \text{ mm}$ jedoch klein. Für den größten Linsendurchmesser bei Blechdicke 2,0 mm stieg die Maximalkraft deutlich gegenüber dem nächst kleineren Linsendurchmesser an. Wurde als zweiter Fügepartner HCT980XD gewählt, war die Maximalkraft deutlich höher als für die Paarung mit HCT600XD oder HCT780XD. Die Maximalkräfte unter Scherzugbelastung der Paarung 22MnB5 (1,5 mm) – HCT600XD (1,5 mm) und 22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (1,5 mm) zeigten wenig Unterschied.

Auch unter Kopfzugbelastung steigt die Maximalkraft mit zunehmendem Linsendurchmesser an. Die Maximalkraft ist höher je dicker das Blech des zweiten Fügepartners ist. Für die Blechdicken 1,8 mm und 2,0 mm ist der Unterschied nicht mehr signifikant. Die Gegenüberstellung der unterschiedlichen Dualphasenstähle zeigte, dass aufgrund der Mischbruchneigung die Ergebnisse der Kopfzugproben stark streuen. Die Maximalkräfte für HCT980XD liegen dabei am unteren und die für HCT600XD am oberen Rand des Streubands. Für die Paarung HCT780XD (1,5 mm) – DC04 (1,0 mm) in Reihe 1c blieb die Maximalkraft für den größten geprüften Linsendurchmesser fast konstant gegenüber dem nächst kleineren.

Die Schälzugproben zeigen im Gegensatz zu Kopfzug- und Scherzugproben wenig Unterschied in der Maximalkraft für die Blechdicken 1,0 mm und 1,3 mm. Der Unterschied wird mit steigender Blechdicke größer. Für Linsendurchmesser mit $d_L \geq 6 \text{ mm}$ blieb die Maximalkraft relativ konstant in Reihen 1a und 1b. Wie auch bei Kopfzugbelastung sind die Streuungen groß. Der HCT980XD bewegt sich am oberen Rand des Streubands, während sich HCT600XD am unteren Streuband befindet. In der Reihe 1c steigt die Maximalkraft für den größten Linsendurchmesser deutlich gegenüber dem nächst kleineren an.

In den Versuchsreihen 1a und 1b treten zwei auffällige Phänomene auf. Für kleine Linsendurchmesser unter Schälzugbelastung kommt es in einigen Reihen zu Streuungen von 100%. Die Proben mit den niedrigen Maximalkräften zeigen Fügeebenenbrüche, während die Proben mit hohen Maximalkräften Mischbrüche mit Ausknöpfanteil im 22MnB5 zeigen. Das zweite Phänomen sind Streuungen in der Maximalkraft unter

Scherzugbelastung bei mittleren und großen Linsendurchmesser von bis zu 35 %. Hier ist der Versagensmodus für alle Proben Mischbruch.

Während Fügeebenenbrüche unter Schälzugbelastung bei kleinen Linsendurchmessern zu einer starken Abnahme der Maximalkraft führen, wirken sich Fügeebenenbrüche unter Scherzug (Scherbruch) nicht negativ auf die Maximalkraft aus. Unter Scherzugbelastung traten Fügeebenenbrüche bei größeren Linsendurchmessern auf. Das Auftreten der Fügeebenenbrüche war nicht von der Linsengröße abhängig, sondern ließ sich auf die Versteifung der Probe durch die hohe Gesamtdicke des Blechpakets zurückführen. Dadurch wurde die Fügeebene und somit das Schweißgut stärker belastet. Fügeebenenbrüche können daher nicht zwingend mit einer Kraftreduktion assoziiert werden.

Zwei Dreiblechverbindungen wurden untersucht. In Versuchsreihe 3 war dies die Verbindung HCT980XD (1,5 mm) – HCT600XD (1,5 mm) – HCT600XD (1,5 mm). Zusätzlich wurden Zweiblechverbindungen mit HCT980XD (1,5 mm) – HCT600XD (1,5 mm) und HCT600XD (1,5 mm) – HCT600XD (1,5 mm) mit gleichem Linsendurchmesser geprüft. Die Versuchsreihe 4 hatte die Kombination 22MnB5 (1,5 mm) – HCT780XD (1,5 mm) – DC04 (1,0 mm). Die Fügestelle der beiden oberen Bleche und die Fügestelle der beiden unteren Bleche korrespondierten zu Zweiblechverbindungen aus Versuchsreihe 1a und 1c.

Eine isolierte Betrachtung der einzelnen Fügeebenen anhand von Zweiblechverbindungen der anliegenden Bleche erwies sich als schwierig. Insbesondere ist unter Scherzug die Belastungssituation der einzelnen Ebenen in der Dreiblechverbindung nicht vergleichbar mit der Belastungssituation in einer Zweiblechverbindung. Durch die niedrigere Gesamtsteifigkeit der Zweiblechverbindung ist die Rotation des Schweißpunkts größer und die Belastungssituation ändert sich zu einem größeren Normalkraftanteil. Am vergleichbarsten sind die Zweiblechverbindungen und einzelne Lastfälle unter Kopfzugbelastung. Allerdings kommt es auch hier durch die passive Blechebene zu leichten Unterschieden in der lokalen Belastung.

Der kritischste Belastungsfall bei Dreiblechverbindungen ist der Fall O-U. Hier werden beide Fügeebenen gleichzeitig belastet. Für die beiden hier untersuchten Verbindungen (Versuchsreihe 3 und Versuchsreihe 4) zeigt sich, dass der Fall O-U unter allen Belastungsarten immer gleich oder kleiner der kleineren Maximalkraft aus Fall O-M und Fall M-U ist. Insbesondere unter Scherzugbelastung kann eine Abnahme der Maximalkraft im Fall O-U auftreten, da hier der Kopfzuganteil größer wird.

$$F_{max, \text{ Fall O-U}} \leq \text{Min}\{F_{max, \text{ Fall O-M}}; F_{max, \text{ Fall M-U}}\}$$

Modelle zur Vorhersage der Tragfähigkeit von ungleichartigen Zweiblechverbindungen unter Scher-, Kopf- und Schälzugbelastung wurden entwickelt. Das Regressionsmodell kann über ein Polynom beschrieben werden und ist somit leicht zu implementieren. Die vorhandenen Daten waren mit vielen Unsicherheiten behaftet. Die Zugfestigkeit und der Linsendurchmesser müssen für viele Datenpunkte ergänzt werden. Dazu wurde bei der Zugfestigkeit der Mittelwert der angegebenen Toleranz aus Datenblättern verwendet. Der Fehler kann hier $\pm 50 \text{ MPa}$ oder mehr betragen. Der Linsendurchmesser wurde häufig aus dem Wert des Punktdurchmessers abgeschätzt. Der tatsächliche Linsendurchmesser kann nur anhand von Schlifffbilder genau bestimmt werden, was jedoch immer noch mit einer Unsicherheit (mittige Schlifffposition, Linsengrenzbestimmung, usw.) und einem hohen Aufwand verbunden ist. Die vorliegenden Proben zeigen weiterhin, dass bei gleichen Schweißparametern unterschiedlich große Linsendurchmesser sich ausbilden können. Ursache können nicht quantifizierbare Unterschiede in den Randbedingungen wie Passung, Oberfläche, Beschichtung, Elektrodenzustand usw. sein, die zu unterschiedlichen Widerstandsverhältnissen führen können. Tendenziell waren die Linsendurchmesser in Kopfzugproben kleiner als in Scherzug- und Schälzugproben.

Die Regressionsmodelle wurden anhand von gleichartigen Verbindungen aus den Daten von [SSC14] erstellt. Dadurch stand eine ausreichende Anzahl an Datenpunkten für die Regression für Kopfzug- und Scherzugbelastung zur Verfügung. Allerdings wies die Datenbank eine sehr kleine Anzahl von Schälzugversuchen auf. Um mit der unausgeglichenen Datenverteilung im Datenraum umzugehen, wurde eine Rastermittlung verwendet. Die erstellten Modelle können im Wesentlichen qualitativ den Einfluss des Linsendurchmessers, Blechdicke und Zugfestigkeit auf die Tragfähigkeit wiedergeben. Der Vergleich der Modelle mit Datenpunkten für gleichartige Verbindungen zeigte eine gute Anpassung.

Zur Übertragung des Modells auf ungleichartige Verbindungen wurde folgender Ansatz gewählt. Die Tragfähigkeit für die gleichartige Verbindung der jeweiligen Fügepartner wurden mit dem Modell berechnet und als Tragfähigkeit der ungleichartigen Verbindung wurde das Minimum der beiden Vorhersagen gewählt. Dieser Minimumansatz kann die Tragfähigkeit einer ungleichartigen Punktschweißverbindung unter Scherzugbelastung gut beschreiben. Es zeigte sich jedoch, dass dieser Ansatz für Kopfzug- und Schälzugbelastung eine Korrektur benötigt, da die ungleichartigen Verbindungen kleinere Maximalkräfte aufweisen als eine gleichartige Verbindung des niederfesteren und/oder dünneren Blechs.

$$F_{max,ungleich} \leq \text{Min}\{F_{max,Blech1}; F_{max,Blech2}\}$$

Um die Ergebnisse der gleichartigen Verbindungen auf ungleichartige Verbindungen zu übertragen, wurde ein Korrekturfaktor für Kopfzug- und Schälzugbelastung entwickelt. Dieser ist für Kopfzugbelastung konstant und hängt für Schälzugbelastung von Blechdicke und Zugfestigkeit ab. Verbesserte Korrekturfaktoren könnten von den Merkmalen Linsendurchmesser, Zugfestigkeit und Blechdicke abhängen. Eventuell wird als weiteres Merkmal die Streckgrenze benötigt, um die Unterschiede in der Verfestigung berücksichtigen zu können. Zur genaueren Beschreibung der wirkenden Zusammenhänge und einer verbesserten Korrektur ist eine systematische Untersuchung für stark unterschiedliche Fügepartner erforderlich.

Nicht alle Details, die in den experimentellen Ergebnissen gefunden wurden, können auch im Regressionsmodell abgebildet werden. Sehr kleine und sehr große Linsendurchmesser werden in der Regel nicht geprüft bzw. sind nicht relevant oder nicht schweißbar. Daher wurden die Vorhersagen für den Bereich $3 \text{ mm} \leq d_L \leq 8 \text{ mm}$, $200 \text{ MPa} \leq R_m \leq 1500 \text{ MPa}$ und $0,5 \text{ mm} \leq t \leq 2 \text{ mm}$ eingeschränkt. Der in den hier durchgeführten Experimenten unter Scherzugbelastung beobachtete Kraftanstieg bei sehr dicken Blechen von Stählen mit Erweichungszone um den Schweißpunkt wird nicht abgebildet. Ebenso fehlt der deutliche Kraftanstieg unter Schälzugbelastung bei sehr duktilen dünnen Blechen und großen Linsendurchmessern.

Das Modell zeigt den höheren Wert aus der Maximalkraft bei Schälzug bei $d_{L,Min}$. Diese Schweißungen sind am unteren Rand des Schweißbereichs. In der Regel wird sichergestellt, dass der Schweißpunkt ausreichend groß ist. Solche diskreten Sprünge, wie sie hier beim Wechsel von Fügeebenenbruch zu Mischbruch auftreten, können mit einem Regressionsmodell nicht abgebildet werden.

Zusammenfassend betrachtet sind die Regressionsmodelle geeignet, um Vorhersagen für die Maximalkraft von Punktschweißverbindungen zu treffen. Die Qualität der Vorhersage wird jedoch durch die Qualität und Quantität der Eingangsdaten bestimmt. Eine gleichmäßige Verteilung der Kombinationen, sowie eine breite Abdeckung des Parameterraumes wirken sich positiv auf die Vorhersagegüte der Modelle aus.

6 Literatur

- [DVS2902-3] DVS-Merkblatt 2902-3: Widerstandspunktschweißen von Stählen bis 3 mm Einzeldicke – Konstruktion und Berechnung, Mai 2015.
- [GSB+12] Gumbsch, P., Sommer, S., Burget, S., Roos, E., Wink, H.-J., Krätschmer, D., Hahn O., Meschut, G., Klokkers, F., Hein, D.: Charakterisierung und Ersatzmodellierung des Bruchverhaltens von Punktschweißverbindungen aus ultrahochfesten Stählen für die Crashsimulation unter Berücksichtigung der Auswirkung der Verbindung auf das Bauteilverhalten, Abschlussbericht FOSTA/AVIF P 806/A 262, 2012.
- [SST+17] Sommer, S.; Schuster, L.; Tümkaya, G.; Meschut, G.; Hein, D.; Weihe, S.; Schreyer, F.; Weber, U.: Charakterisierung und Modellierung der Beeinflussung des Bauteilverhaltens durch Erweichungszonen an Schweißpunkten höchst- und ultrahochfester Stähle unter Crashbelastung, Abschlussbericht FOSTA/AIF P 1018, IGF-Vorhaben Nr. 17991 N, 2017.
- [She17] O. Sherepenko, N. Mitzschke, und S. Jüttner: Microstructural Imperfections in the HAZ of Resistance Spot Welded Ultra High Strength Steel 22MnB5 and Their Impact on Joint Fracture, Juli 2017.
- [SBB14] Sommer, S.; Burget, S.; Bentele, R.: Bruchverhalten von hochfesten Stählen beim Widerstandspunktschweißen – Schädigungssimulation. Abschlussbericht, IWM Bericht V1134/2014, K-Projekt Join4+, 2014.
- [SSC14] Sommer, S.; Steffes-lai, D.; Clees, T: Entwicklung einer numerischen Methode zur Berücksichtigung stochastischer Effekte für die Crashsimulation von Punktschweißverbindungen, Schlussbericht AVIF Vorhaben A265 numSTEPS, 2014.
- [Som09] Sommer, S.: Modellierung des Verformungs- und Versagensverhaltens von Punktschweißverbindungen unter monoton ansteigender Belastung, Dissertation Universität Karlsruhe, 2009.
- [Val17] J. Valera, V. Miguel, A. Martínez, J. Naranjo, und M. Cañas, „Optimization of electrical parameters in Resistance Spot Welding of dissimilar joints of microalloyed steels TRIP sheets“, *Procedia Manufacturing*, Bd. 13, S. 291–298, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.074.
- [Yua17] X. Yuan, C. Li, J. Chen, X. Li, X. Liang, und X. Pan, „Resistance spot welding of dissimilar DP600 and DC54D steels“, *Journal of Materials Processing Technology*, Bd. 239, S. 31–41, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.08.012.
- [Som06] Sommer S., Sun D.-Z., Charakterisierung und Bewertung der Tragfähigkeit punktgeschweißter Stahlblechverbindungen unter Crashbelastung mit Hilfe von erweiterten Schädigungsmodellen Abschlussbericht zu AVIF-Forschungsvorhaben Nr. A 173 / S24/10055/03, 2006.
- [Hui16] T. Huin, S. Dancette, D. Fabrègue, und T. Dupuy, „Investigation of the Failure of Advanced High Strength Steels Heterogeneous Spot Welds“, *Metals*, Bd. 6, Nr. 5, S. 111, Mai 2016, doi: 10.3390/met6050111.
- [Ba20] R. Backes, „Vorhersage der Verbindungstragfähigkeit auf Basis der Prozessparameter beim Widerstandspunktschweißen mittels Machine Learning“, Bachelor Thesis, Hochschule Offenburg, 2020.
- [Schi17] V. Schilow, „ Experimentelle und simulative Untersuchung der Einflüsse unterschiedlicher Lastangriffe auf die Tragfähigkeit von zweischnittigen Punktschweißverbindungen“, Master Thesis, Hochschule Offenburg, 2017.
- [Sci11] Scikit-learn: Machine Learning in Python, Pedregosa et al., *JMLR* 12, pp. 2825–2830, 2011.

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2014)

Nr.	Titel
263	Laserstrahlschweißen von Stahl an Aluminium mittels spektroskopischer Kontrolle der Einschweißtiefe und erhöhter Anbindungsbreite durch zweidimensional ausgeprägte Schweißnähte, 2014
264	Entwicklung von Methoden zur zuverlässigen Metamodellierung von CAE Simulations-Modellen, 2014
265	Auswirkungen alternativer Antriebskonzepte auf die Fahrdynamik von PKW, 2014
266	Entwicklung einer numerischen Methode zur Berücksichtigung stochastischer Effekte für die Crashsimulation von Punktschweißverbindungen, 2014
267	Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 1, 2014
268	Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 2, 2014
269	Schwingfestigkeitsbewertung von Schweißnahtenden MSG-geschweißter Feinblechstrukturen aus Aluminium, 2014
270	Physiologische Effekte bei PWM-gesteuerter LED-Beleuchtung im Automobil, 2015
271	Auskunft über verfügbare Parkplätze in Städten, 2015
272	Zusammenhang zwischen lokalem und globalem Behaglichkeitsempfinden: Untersuchung des Kombinationseffektes von Sitzheizung und Strahlungswärmeübertragung zur energieeffizienten Fahrzeugklimatisierung, 2015
273	UmCra - Werkstoffmodelle und Kennwertermittlung für die industrielle Anwendung der Umform- und Crash-Simulation unter Berücksichtigung der mechanischen und thermischen Vorgeschichte bei hochfesten Stählen, 2015
274	Exemplary development & validation of a practical specification language for semantic interfaces of automotive software components, 2015
275	Hochrechnung von GIDAS auf das Unfallgeschehen in Deutschland, 2015
276	Literaturanalyse und Methodenauswahl zur Gestaltung von Systemen zum hochautomatisierten Fahren, 2015
277	Modellierung der Einflüsse von Porenmorphologie auf das Versagensverhalten von Al-Druckgussteilen mit stochastischem Aspekt für durchgängige Simulation von Gießen bis Crash, 2015
278	Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen, 2015
279	Sensitivitätsanalyse rollwiderstandsrelevanter Einflussgrößen bei Nutzfahrzeugen – Teil 3, 2015
280	PCM from iGLAD database, 2015
281	Schwere Nutzfahrzeugkonfigurationen unter Einfluss realitätsnaher Anströmbedingungen, 2015
282	Studie zur Wirkung niederfrequenter magnetischer Felder in der Umwelt auf medizinische Implantate, 2015
283	Verformungs- und Versagensverhalten von Stählen für den Automobilbau unter crashartiger mehrachsiger Belastung, 2016
284	Entwicklung einer Methode zur Crashsimulation von langfaserverstärkten Thermoplast (LFT) Bauteilen auf Basis der Faserorientierung aus der Formfüllsimulation, 2016
285	Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf realer Fahrbahn, 2016

- 286 χ MCF - A Standard for Describing Connections and Joints in the Automotive Industry, 2016
- 287 Future Programming Paradigms in the Automotive Industry, 2016
- 288 Laserstrahlschweißen von anwendungsnahen Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2016
- 289 Untersuchung der Bewältigungsleistung des Fahrers von kurzfristig auftretenden Wiederübernahmesituationen nach teilautomatischem, freihändigem Fahren, 2016
- 290 Auslegung von geklebten Stahlblechstrukturen im Automobilbau für schwingende Last bei wechselnden Temperaturen unter Berücksichtigung des Versagensverhaltens, 2016
- 291 Analyse, Messung und Optimierung des Ventilationswiderstands von Pkw-Rädern, 2016
- 292 Innenhochdruckumformen laserstrahlgelöteter Tailored Hybrid Tubes aus Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2017
- 293 Filterung an Stelle von Schirmung für Hochvolt-Komponenten in Elektrofahrzeugen, 2017
- 294 Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Feinbleche aus Stahl unter kombinierter Beanspruchung, 2017
- 295 Wechselwirkungen zwischen zyklisch-mechanischen Beanspruchungen und Korrosion: Bewertung der Schädigungsäquivalenz von Kollektiv- und Signalformen unter mechanisch-korrosiven Beanspruchungsbedingungen, 2017
- 296 Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur, 2017
- 297 Analyse zum Stand und Aufzeigen von Handlungsfeldern beim vernetzten und automatisierten Fahren von Nutzfahrzeugen, 2017
- 298 Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwertes von realen Nutzfahrzeugen im Fahrversuch und Vergleich verschiedener Verfahren zur numerischen Simulation, 2017
- 299 Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen, 2017
- 300 Thermisches Rollwiderstandsmodell für Nutzfahrzeugreifen zur Prognose fahrprofilspezifischer Energieverbräuche, 2017
- 301 The Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter in Ambient Air, 2017
- 302 Design Paradigms for Multi-Layer Time Coherency in ADAS and Automated Driving (MULTIC), 2017
- 303 Experimentelle Untersuchung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit von Scheiben auf die Kondensatbildung, 2017
- 304 Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter realen Umgebungsbedingungen, 2018
- 305 Simulationsgestützte Methodik zum Entwurf intelligenter Energiesteuerung in zukünftigen Kfz-Bordnetzen, 2018
- 306 Einfluss der Kantenbearbeitung auf die Festigkeitseigenschaften von Stahl-Feinblechen unter quasistatisch und schwingender Beanspruchung, 2018
- 307 Fahrerspezifische Aspekte beim hochautomatisierten Fahren, 2018
- 308 Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter zeitvarianten Betriebsbedingungen, 2018
- 309 Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Schraubverbindungen mit gefurchem Gewinde, 2018
- 310 Konzept zur Auslegungsmethodik zur Verhinderung des selbsttätigen Losdrehens bei Bauteilsystemen im Leichtbau, 2018
- 311 Experimentelle und numerische Identifikation der Schraubenkopfverschiebung als Eingangsgröße für eine Bewertung des selbsttätigen Losdrehens von Schraubenverbindungen, 2018

- 312 Analyse der Randbedingungen und Voraussetzungen für einen automatisierten Betrieb von Nutzfahrzeugen im innerbetrieblichen Verkehr, 2018
- 313 Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von Aluminiumwerkstoffen für die Crashesimulation, 2018
- 314 Definition einer „Äquivalenten Kontakttemperatur“ als Bezugsgröße zur Bewertung der ergonomischen Qualität von kontaktbasierten Klimatisierungssystemen in Fahrzeugen, 2018
- 315 Anforderungen und Chancen für Wirtschaftsverkehre in der Stadt mit automatisiert fahrenden E-Fahrzeugen (Fokus Deutschland), 2018
- 316 MULTIC-Tooling, 2019
- 317 EPHoS: Evaluation of Programming - Models for Heterogeneous Systems, 2019
- 318 Air Quality Modelling on the Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter Concentrations Using a High-Resolution Brake Use Inventory, 2019
- 319 Dehnratenabhängiges Verformungs- und Versagensverhalten von dünnen Blechen unter Scherbelastung, 2019
- 320 Bionischer LAM-Stahlleichtbau für den Automobilbau – BioLAS, 2019
- 321 Wirkung von Systemen der aktiven, passiven und integralen Sicherheit bei Straßenverkehrsunfällen mit schweren Güterkraftfahrzeugen, 2019
- 322 Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen - Umsetzung und Anwendung, 2019
- 323 Transitionen bei Level-3-Automation: Einfluss der Verkehrsumgebung auf die Bewältigungsleistung des Fahrers während Realfahrten, 2019
- 324 Methodische Aspekte und aktuelle inhaltliche Schwerpunkte bei der Konzeption experimenteller Studien zum hochautomatisierten Fahren, 2020
- 325 Der Einfluss von Wärmeverlusten auf den Rollwiderstand von Reifen, 2020
- 326 Lebensdauerberechnung hybrider Verbindungen, 2020
- 327 Entwicklung der Verletzungsschwere bei Verkehrsunfällen in Deutschland im Kontext verschiedener AIS-Revisionen, 2020
- 328 Entwicklung einer Methodik zur Korrektur von EES-Werten, 2020
- 329 Untersuchung zu den Einsatzmöglichkeiten der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Entwicklung von 3D-Rahmenstrukturen in Crashlastfällen, 2020
- 330 Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen, 2020
- 331 Effiziente Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von LFT für Crashesimulation, 2020
- 332 Charakterisierung und Modellierung des Versagensverhaltens von Komponenten aus duktilem Gusseisen für die Crashesimulation, 2020
- 333 Charakterisierung und Meta-Modellierung von ungleichartigen Punktschweißverbindungen für die Crashesimulation, 2020

Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 www.vda-fat.de
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2020

Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de
Twitter @VDA_online

VDA | Verband der
Automobilindustrie

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de/fat

FAT | Forschungsvereinigung
Automobiltechnik