



Methode zur Robustheitssteigerung einer Heckdeckelproduktion

Dissertation
zur Erlangung eines Doktorgrades

(Dr.-Ing.)

in der
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik

der
Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von
Anke Beckmann
aus Wetzlar

Wuppertal 2018

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20190729-154048-9

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20190729-154048-9>]

DOI: 10.25926/6kwt-1k43

[<https://doi.org/10.25926/6kwt-1k43>]

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Gust (Bergische Universität Wuppertal)
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Axel Schumacher (Bergische Universität Wuppertal)
Drittgutachterin: Prof. Dr. rer. nat. Margot Ruschitzka (Technische Hochschule Köln)

Tag der mündlichen Prüfung: 08.10.2018

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Doktorandenzeit im Forschungs- und Entwicklungszentrum der Daimler AG in Sindelfingen sowie in Kooperation mit dem Lehrstuhl Konstruktion (Engineering Design) der Bergischen Universität Wuppertal. Während dieser Zeit wurde ich auf unterschiedlichste Art und Weise unterstützt, wofür ich hier meinen Dank ausspreche.

An erster Stelle hervorgehoben danke ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Gust von der Bergischen Universität Wuppertal. Ebenso gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Axel Schumacher von der Bergischen Universität Wuppertal und Frau Prof. Dr. rer. nat. Margot Ruschitzka von der Technischen Hochschule Köln für die Übernahme des Koreferats.

Schließlich möchte ich mich aber auch noch explizit bei meinem persönlichen Umfeld für die Unterstützung bedanken, vor allem bei meinem Ehemann, unseren beiden Hunden, meinen Eltern und Geschwistern sowie meinen Freunden.

Böblingen, Oktober 2018

Anke Beckmann

Inhaltsverzeichnis

GLOSSAR	VII
NOMENKLATUR	XII
KURZFASSUNG	XV

I EINLEITUNG **1**

1. PROBLEMFELDDEFINITION UND ZIELSETZUNG **1**

1.1 AUTOMOBILBAU HEUTE	1
1.2 QUALITÄTSWESEN MORGEN	2
1.3 INHALT DER ARBEIT	3

II GRUNDLAGEN **4**

2. KAROSSERIEBAU **4**

2.1 PRODUKTIONSANLAGEN UND RANDBEDINGUNGEN	4
2.1.1 FÜGEPROZESSE IM KAROSSERIEBAU	6
2.1.2 TOLERANZKONZEPT, MESSVERFAHREN UND QUALITÄTSREGELKARTEN	10
2.1.3 PROZESSSTEUERUNG MITTELS GEOMETRIEFESTLEGENDEN STATIONEN	14
2.2 ANMUTUNG UND PRÄZISION	16
2.2.1 ENTWICKLUNGSSEITIGE OPTIMIERUNG DER QUALITÄT	16
2.2.2 PRODUKTIONSSEITIGE OPTIMIERUNG DER QUALITÄT	20
2.2.3 FAZIT ZUM FORSCHUNGSSTAND	24

3. MATHEMATIK UND STATISTIK **25**

3.1 KÜNSTLICHE NEURONALE NETZE ZUR OBJEKTIVIERUNG DER PROZESSKONTROLLE	25
3.2 STATISTISCHE PROZESSSTEUERUNG	30
3.3 STATISTISCHE METHODEN ZUR NUTZUNG VON STICHPROBEN	32
3.4 ZENTRALER GRENZWERTSATZ NORMALVERTEILTER VARIABLEN	34
3.5 STATISTISCHE VERSUCHSPLANUNG	34
3.6 ZEITREIHENANALYSEN	35
3.7 KORRELATION	36

III MODELLIERUNG **37**

4. METHODE ZUR ROBUSTHEITSTEIGERUNG EINER HECKDECKELPRODUKTION **37**

4.1 VORBEREITUNGSPHASE	38
4.2 REGELUNGSZYKLUS	39

4.3 VALIDIERUNGSPHASE	40
5. KONKRETISIERUNG DER ENTWICKELTEN METHODE	41
5.1 VORBEREITUNGSPHASE	41
5.1.1 DEFINITION MESSVORHABEN	41
5.1.2 DEFINITION STATIONSZEITPROGNOSE	53
5.1.3 TRAININGSDATENSÄTZE GENERIEREN	61
5.1.4 NEURONALES NETZ GENERIEREN UND TRAINIEREN	66
5.2 REGELUNGSZYKLUS	73
5.2.1 EINGANGSDATEN FÜR NEURONALES NETZ BEREITSTELLEN	74
5.2.2 AUSGANGSDATEN VON NEURONALEM NETZ VERARBEITEN	75
5.3 VALIDIERUNGSPHASE	76
5.3.1 QUALITÄT DES REGELKREISES ÜBERPRÜFEN	76
IV FAZIT	80
6. DISKUSSION	80
7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	91
LITERATURVERZEICHNIS	93

Glossar

3-2-1 Prinzip	Das 3-2-1 Prinzip beschreibt die Einschränkung der Freiheitsgrade im Raum. Dabei wird ein starrer Körper mit drei Ebenen beschrieben. Die primäre Ebene bildet sich aus drei Punkten, die sekundäre Ebene mit zwei weiteren Punkten und die tertiäre Ebene mit einem weiteren Punkt.
6M-Methode	Die 6M-Methode beschreibt die wichtigsten Faktoren zur Bestimmung der Messmittelfähigkeit: Milieu (Umwelt), Methode (Messart), Mensch (Einlegen der Bauteile in Vorrichtung), Messen (Messunsicherheit), Material (z.B. bei optischer Messtechnik: spiegelnde Oberfläche) und Maschine (Zustand, Spannposition).
100%-Kontrolle	Eine 100%-Kontrolle meint die Überwachung von 100 % aller Bauteile an 100 % aller im Vorfeld definierten Merkmale.
Anmutung	Anmutung beschreibt die subjektive Wahrnehmung der Qualität z.B. eines Produkts.
Aufsprungverhalten	Aufsprungverhalten beschreibt die Veränderung der Maßhaltigkeit durch Eigenspannungen nach Lösen der Spannelemente in der geometriefestlegenden Station.
Bauteilabweichung	Bauteilabweichung beschreibt die Abweichung der Realgeometrie von der Sollgeometrie.
BCA	Brain Construction Algorithmus zur Festlegung der optimalen Neuronenzahl N_{Neuronen}
Best-Fit-Verfahren	Das Best-Fit-Verfahren beschreibt die möglichst optimale Ausrichtung und Fügung zweier Bauteile zueinander. Hierbei werden die beiden Fügepartner zunächst vermessen und anschließend durch Vermittlung der Toleranzen bestmöglich in Bezug auf zuvor festgelegten Kriterien gefügt.
Bottom-Up	Bottom-Up beschreibt die Wirkrichtung eines Prozesses. Hierbei geht es darum vom Anfänglichen (Einzelteil) zum großen Ganzen (Zusammenbau) die Wirkzusammenhänge zu betrachten.
CAD	Computer-Aided Design meint rechnerunterstütztes Konstruieren.
Charge	Unter dem Begriff Charge ist der Zusammenschluss aller Einzelteile die innerhalb einer Abpressung, also zwischen zwei Werkzeugwechseln, gefertigt werden, zu verstehen.

chargenidentisch	Kombination von Bauteilen verschiedener Einzelteiltypen, die jeweils typintern dieselben Chargen aufweisen.
Coil	Ein Coil beschreibt eine aufgerollte Blechbahn, aus der Blechplatinen geschnitten und daraus Pressteile gefertigt werden.
DoE	Design of Experiments beschreibt die gezielte Parametervariation nach einem hierbei definierten statistischen Versuchsplan um mit minimalem Aufwand die gewünschte Mindestgenauigkeit der Modellaussagen zu erreichen.
FEM	Die Finite-Elemente-Methode ist eine numerische Lösungsmethodik für physikalisch-technische Anwendungen.
First-In-First-Out (FIFO)	Das FIFO-Prinzip beschreibt das Abarbeitungsprinzip „der Reihe nach“. Hierbei werden z.B. im Hochregallager Bauteile zuerst weiterverarbeitet, die zuerst eingelagert worden sind.
Geometriefestlegende Station	Die geometriefestlegende Station ist die Vorrichtung in den Fügestationen, in denen die Bauteile während des Fügevorgangs mit Spannelemente in ihrer Position fixiert sind.
Gewichtsmatrix	Die Gewichtsmatrix ist Teil der mathematischen Beschreibung eines neuronalen Netzes. Inhalt sind die Gewichte der einzelnen Verbindungen zwischen den jeweiligen Neuronen. Über die Gewichte ist der Zusammenhang von Ein- und Ausgangsvektor des Netzes beschrieben. In der Gewichtsmatrix ist das Wissen des künstlichen neuronalen Netzes gespeichert.
Goldene Regel der Messtechnik	Für das Verhältnis von Messunsicherheit zu Toleranzband ist ein Wert kleiner 10 % anzustreben. Dies besagt die „goldene Regel der Messtechnik“. Zwischen 10 und 30 % gilt der Messaufbau für die Anwendung als noch akzeptabel, über 30 % jedoch als nicht mehr geeignet.
IST-Maß	Das IST-Maß beschreibt die Realgeometrie eines Bauteils an einem bestimmten Merkmal.
Just-in-Time Prinzip	Das Just-in-Time Prinzip beschreibt die bedarfssynchrone Produktion. Die Lieferung der benötigten Bauteile erfolgt hierbei zum exakten Zeitpunkt der Verwendung.
Hygienefaktor	Eigenschaften, die dem Hygienefaktor zuzuordnen sind, verhindern bei Vorhandensein auf der einen Seite die Unzufriedenheit, steigern aber auf der anderen Seite nicht die Zufriedenheit bei einem Kunden.

Karosserierohbau	Der Karosserierohbau, auch Rohbau oder Karosseriebau, ist ein Produktionsbereich in der Automobilindustrie. Hier entsteht durch verschiedene Fügeoperationen aus hunderten Einzelteilen aus dem Presswerk die Karosserie eines Fahrzeugs.
Magazin	Der Bauteilspender, in dem die Bauteile separiert bereitliegen um vom Roboter entnommen zu werden, wird als Magazin bezeichnet.
Maßabweichung	Die Maßabweichung beschreibt den Betrag der Differenz vom „IST-Maß“ zum „SOLL-Maß“.
Maßhaltigkeit	Maßhaltigkeit ist eine Maßabweichung, die sich innerhalb der definierten Toleranzgrenzen des betreffenden Merkmals befindet.
Mehrzieloptimierung	Bei der Mehrzieloptimierung erfolgt die Optimierung nach verschiedenen Kriterien, die voneinander abhängig sind; dies erzeugt immer eine Paretofront.
Messmittelfähigkeit	Die Fähigkeit eines Messmittels beschreibt die Eigenschaft, die geforderte Messaufgabe mindestens mit der geforderten Genauigkeit erfüllen zu können.
Messpunktwolke	Anordnung einer großen Anzahl an Messpunkten im Raum z.B. auf einem Bauteil.
Messunsicherheit	Die Messunsicherheit beschreibt die Unsicherheit mit der ein Messergebnis ausgegeben wird ((Mess-)Prozesswiederholgenauigkeit). Sie setzt sich aus verschiedenen Einflussfaktoren, die am Messprozess beteiligt sind, zusammen. Hierbei sind z.B. Umwelteinflüsse zu nennen.
Metamodell	Ein Metamodell ist eine abstrahierte mathematische Beschreibung eines realen Prozesses oder eines Simulationsmodells mit einer eingeschränkten Anzahl an Parametern.
Mittenswert	Der Mittenwert beschreibt den Wert genau in der Mitte zwischen den Toleranzgrenzen. Bei einer Vergabe einer einseitigen Toleranz liegt der Mittenwert nicht auf dem SOLL-Maß.
Multidisziplinäre Optimierung	Bei der multidisziplinären Optimierung erfolgt die Optimierung nach verschiedener Faktoren unterschiedlicher Fachgebiete.
Neuronales Netz	Neuronale Netze (NN) gliedern sich in künstliche/digitale und biologische Netze. Die künstlichen/digitalen Netze sind der Wirkungsweise nach den biologischen Netze nachempfunden.
Paretofront	Die Paretofront beschreibt ein Optimierungsproblem, bei dem es nicht möglich ist eine Eigenschaft zu verbessern ohne eine andere zugleich zu verschlechtern.

Puffersystem	Puffersysteme sind Zwischenlager, die ggf. nach einem definierten Konzept Bauteile sortieren und ausgeben und dadurch Produktionsprozesse voneinander entkoppeln können.
Pull-Prinzip	Das Pull-Prinzip wird auch Kanban-Methode genannt. Um Bauteilstaus und -lagerungen in den Produktionsbereichen zu vermeiden, werden Bauteile entsprechend dem aktuellen Verbrauch an der Anlage z.B. beim Hochregallager angefordert.
Qualitätsgerechte Produktgestaltung	Auch kundengerechte Produktgestaltung. Hierbei liegen die zuvor erfassten Kundenwunschmerkmale im Fokus der Produktentwicklung.
Qualitätsregelkarte	Qualitätsregelkarten finden im Qualitätswesen zur Dokumentation und Auswertung von Messreihen Anwendung. Sie sind ein wesentliches Werkzeug der SPC-Steuerung.
Reichweite	Die Reichweite einer Charge beschreibt die Dauer, die es benötigt, alle Bauteile dieser Charge in den Prozess einzuschleusen. Die Reichweite beginnt, wenn das erste Bauteil in die Anlage eingeschleust wird und endet, wenn das letzte Bauteil der Charge eingeschleust wird.
Robustheit	Robustheit beschreibt die Unempfindlichkeit des Prozesses gegenüber nicht exakt kontrollierbaren Eingangsgrößen.
Shims/Shimsplatte	Ein Shims ist eine Unterlegscheibe (engl. Shim) zum Justieren der Spannposition an der Spannvorrichtung in der geometriefestlegenden Station.
SOLL-Maß	Das SOLL-Maß beschreibt die Idealgeometrie eines Bauteils an einem bestimmten Merkmal.
Spannelement	Ein Spannelement/Spanner in einer geometriefestlegenden Station fixiert ein Bauteil oder einen Zusammenbau in der vorgegeben Spannrichtung. Ein Spannelement kann als Flächenspanner oder als Fixierstift ausgeführt sein.
Spann- und Fixierkonzept	Im Spann- und Fixierkonzept sind die Bezugsstellen zur Fixierung und reproduzierbaren Beschreibung eines Bauteils oder Zusammenbaus definiert.
SPC-Steuerung	Das „statistical process control“-Verfahren ist eine Qualitätstechnik zur Steuerung und Optimierung von Produktionsprozessen unter Anwendung von statistischen Zusammenhängen.
Toleranzband	Toleranzband ist definiert als Abstand von unterer zu oberer Toleranzgrenze.

Toleranzkonzept	Das Toleranzkonzept beinhaltet die Aufbaureihenfolge, die Referenzpunkte (bzw. Spann und Fixierkonzept) und die zulässigen Toleranzgrenzen vom Einzelteil bis hin zum Zusammenbau. Hierbei fließen die Kenntnisse der Fehlerfortpflanzung der Fertigungsprozesse mit ein.
Top-Down	Top-Down beschreibt die Wirkrichtung eines Prozesses. Hierbei geht es darum vom großen Ganzen (Zusammenbau) kommend rückwärts die Wirkzusammenhänge zum Anfänglichen (Einzelteil) zu ermitteln.
Übertragungsfunktion	Die Übertragungsfunktion beschreibt den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße.
Validierung	Die Validierung beschreibt den Test der Gültigkeit eines Modells mittels Testergebnissen im realen Fall.
Werker	Ein Werker ist ein Mitarbeiter in der Produktion.
Wiederholgenauigkeit	Die Wiederholgenauigkeit definiert die reine Messunsicherheit der Messmaschine, ohne weitere Einflüsse, wie z.B. Werkereinfluss.
Worst-Case-Fall	Der Worst-Case-Fall im Karosseriebau beschreibt den Fall, in dem ein maximal schlecht maßhaltiges Bauteil mit einem anderen maximal schlecht maßhaltigen Bauteil verbaut wird.

Nomenklatur

a	Ausgabe eines Neurons im neuronalen Netz
α_i	Irrtumswahrscheinlichkeit
α_G	Glättungsfaktor bei exponentieller Glättung/Zeitreihenanalyse
b	Trendfaktor einer Prognose/Zeitreihenanalyse
C_p	Prozesspotenzial bzw. Qualitätsfähigkeitskennzahl
C_{pk}	Prozessfähigkeit bzw. Qualitätsfähigkeitskennzahl
C_{pm}	Prozessrobustheit
d	Grundwert einer Prognose/Zeitreihenanalyse
δ	Delta-Wert eines Neurons im neuronalen Netz
ε	Lernparameter des Lernalgorithmus eines neuronalen Netzes
ESSE	Netzwerkfehler (sum of squared errors – Summe der quadratischen Fehler)
esSE	Gemittelter, absoluter Netzwerkfehler $ESSE$, pro Versuch und Messpunkt
f_{Akt}	Aktivitätsfunktion eines Neurons/des neuronalen Netzes
I	Konfidenzintervall/ Vertrauensbereich der Standardabweichung
Input_{ij}	Eingabewert, den ein Neuron i von einem anderen Neuron j erhält
K_t	Korrekturfaktor der saisonalen Abrufprognose von Bauteilen
μ	Mathematischer Mittelwert
μ_{Shims}	Mittelwert der propagierten Shimseinstellungen des neuronalen Netzes
m	Mittenswert: mittig zwischen oberer Toleranzgrenze und unterer Toleranzgrenze
N_{Anzahl_Einzelteiltypen}	Anzahl der Einzelteiltypen, die in der ausgewählten Anlage verbaut werden
N_{Ausgabeneuronen}	Anzahl der Neuronen der Ausgabeschicht
N_{Neuronen}	Neuronenzahl der verdeckten Schicht
N_{Versuche}	Größe des aus Messungen gewonnenen Datensatzes für das neuronale Netz
N_{Spannelemente}	Anzahl der in der ausgewählten Anlage verfügbaren Spannelemente
N_{Spannelemente_relevant}	Anzahl der in der ausgewählten Anlage relevanten Spannelemente
N_{Shimseinstellmöglichkeiten}	Anzahl der in der ausgewählten Anlage verfügbaren Shimseinstellmöglichkeiten
N_{Shimseinstellmöglichkeiten_relevant}	Anzahl der in der ausgewählten Anlage relevanten Shimseinstellmöglichkeiten
N_{Shimskombinationen}	Anzahl an möglichen Shimskombinationen auf Basis der relevanten Shimseinstellmöglichkeiten
N_{Shimskombinationen_nach_DoE}	Reduzierte Anzahl an Shimskombinationen nach DoE Versuchsplan

$N_{\text{Shimseinstellmöglichkeit_je_Spannelement}}$	Anzahl der am ausgewählten Spannelement verfügbaren Shimseinstellmöglichkeiten, spezifisch je Spannelement
$N_{\text{Shimseinstellmöglichkeit_relevant_je_Spannelement}}$	Anzahl der am ausgewählten Spannelement relevanten Shimseinstellmöglichkeiten, spezifisch je Spannelement
$N_{\text{Chargengröße_X}}$	Stückzahl von Einzelteilen eines Einzelteiltyps, die im Presswerk innerhalb eines Abpressauftrags gefertigt werden, spezifisch je Charge
$N_{\text{Tagesabrufe(t)}}$	Tagessollmenge der Produktion
n	Mathematische Stichprobengröße
n_{Chargen}	Größe der Stichprobe von unterschiedlicher Chargen, die innerhalb des Versuchsplans Verwendung finden sollen für den ersten Trainingsdatensatz des neuronalen Netzes
$n_{\text{Mittelwert}}$	Größe der Stichprobe, die zur Annäherung des Mittelwertes der Stichprobe an den Mittelwert der Grundgesamtheit herangezogen werden sollte
$n_{\text{Standardabweichung}}$	Größe der Stichprobe, die zur Annäherung der Standardabweichung der Stichprobe an die Standardabweichung der Grundgesamtheit herangezogen werden sollte
o_{Tg}	Obere Toleranzgrenze (vgl. u_{Tg})
o_{Sg}	Obere Shimsgrenze (vgl. u_{Sg})
$o_{\text{Sg}_{\text{real}}}$	Obere real genutzte Shimsgrenze (vgl. $u_{\text{Sg}_{\text{real}}}$)
PWG	Prozesswiederholgenauigkeit nach der 6M-Methode
p	Prognosewert einer Zeitreihenanalyse
P	Anzahl der betrachteten vergangenen Perioden einer Zeitreihenanalyse
q	Tatsächlicher Wert der Prognose einer Zeitreihenanalyse
r_{XY}	Mathematischer Korrelationskoeffizient der diskreten Datenreihen/Größen X und Y
σ	Mathematische Standardabweichung
σ_{sn}	Geschätzte Standardabweichung
σ_{Shims}	Standardabweichung der propagierten Shimseinstellungen des neuronalen Netzes
$\sigma_{\text{ZB,ALT}}$	Standardabweichung der Zusammenbaumaßhaltigkeiten vor Einsatz der entwickelten Methodik
$\sigma_{\text{ZB,NEU}}$	Standardabweichung der Zusammenbaumaßhaltigkeiten nach Einsatz der entwickelten Methodik
$\sigma_{\text{ZB,WUNSCH}}$	Gewünschte Standardabweichung der Zusammenbaumaßhaltigkeiten nach Einsatz der entwickelten Methodik
σ_{X}	Standardabweichung der Werte von Merkmal X
σ_{Y}	Standardabweichung der Werte von Merkmal Y
σ_{XY}	Kovarianz der Werte von Merkmal X und Y
$S(t)$	Saisonfaktor zur Vorhersage von Bauteilabrufzahlen
TB	Toleranzbreite: Betrag der Differenz von oberer Toleranzgrenze und unterer Toleranzgrenze
$t_{\text{Abfahrt_X}}$	Abfahrtszeitpunkt des ersten Ladungsträgers einer Charge im Hochregallager, spezifisch je Charge

t_{Puffer}	Pufferzeit an der Fertigungsanlage
t_{Reichweite_X}	Zeitliche Reichweite der einer Charge, Zeit vom Verbau des ersten Bauteils bis zum Verbau des letzten Bauteils der Charge, spezifisch je Charge
t_{Schichtausfälle_X}	Zeitliche Summe aller zu erwartenden Schichtausfälle: während Ausfallschichten werden keine Bauteile angefordert, bzw. verbaut, dadurch verlängert sich die Reichweite um die zeitliche Länge der Ausfälle, spezifisch je Charge
t_{Störungen}	Zeitliche Summe aller zu erwartenden Störungen: während Störungen werden keine Bauteile angefordert, bzw. verbaut, dadurch verlängert sich die Reichweite um die zeitliche Länge der Störungen, spezifisch je Charge
t_{Transport}	Transportzeit eines Ladungsträgers vom Hochregallager bis zur Fertigungsanlage
t_{Verbau_Anf_X}	Verbauzeitpunkt/Anfang der nächsten Charge, spezifisch je Charge
t_{Verbau_End_X}	Endzeitpunkt der laufenden bzw. nächsten Charge, spezifisch je Charge
u_{Tg}	Untere Toleranzgrenze (vgl. o _{Tg})
u_{Sg}	Untere Shimsgrenze (vgl. u _{Sg})
u_{Sg_{real}}	Untere real genutzte Shimsgrenze (vgl. o _{Sg_{real}})
o_{i,j}	Propagiertes Ausgangsvektor / propagierte Shimseinstellung des neuronalen Netzes
x_{i,j}	Eingangsvektor / Messdaten an Einzelteil und Zusammenbau
y_{i,j}	Wahrer Ausgangsvektor / wahre Shimseinstellung der Fertigungsanlage
w_{ij}	Gewicht zwischen empfangenden Neuron i und sendenden Neuron j
χ²	Quantil der chi - Quadratverteilung

Kurzfassung

Es wurde eine Methode entwickelt, mit der im Karosseriebau ein Qualitätsregelkreis des Zusammenbauprozesses für fugenbildende Anbauteile objektiviert und die Robustheit gesteigert werden kann. Die entwickelte Methode nutzt einen Bottom-Up Ansatz, bei dem mit Hilfe eines künstlichen neuronalen Netzes (KNN) und überwachtem Lernen ein Zusammenhang zwischen Einzelteilmaßhaltigkeiten, shimsbasierten Fügeprozessen (kontrolliert über Spannelemente in den geometriefestlegenden Stationen) und Zusammenbaumaßhaltigkeiten hergestellt wird. Dabei ist der Regelkreis so konzipiert, dass die Justage chargenweise und mit prozessbegleitender Vorlaufzeit quasi instantan geschehen kann. Die vorliegende Arbeit arbeitet die Methode exemplarisch am Heckdeckelrohbau eines Premiumautomobilherstellers aus und prüft einige ihrer grundlegend notwendigen, experimentellen und theoretischen Arbeitsschritte auf Durchführbarkeit. Entsprechende anlagenspezifische Besonderheiten und typisches Auftreten gewachsener Strukturen im Karosseriebau wurden praxisnah berücksichtigt. Grundsätzlich ist die Methode gleichzeitig mit leichten Modifikationen übertragbar auf ähnliche Anlagen zur Herstellung z.B. von Türen und Klappen. Der hier gewählte Heckdeckelzusammenbau wird aus sieben blechumgeformten Einzelteilen aus Aluminium-Legierung mittels der beiden fügenden Verfahren Laserschweißen und Klebe-Falzen gefertigt. Vorgegangen wird dabei wie folgt: Eine Vorbereitungsphase dient dazu, den vorliegenden Fügeprozess zu analysieren und über die Wahl eines geeigneten Messverfahrens inklusive Festlegung eines Spann- und Fixierkonzepts und eines DoE-Versuchsplans („Design of Experiments“) experimentelle Daten für das Training und Testen des KNN zu generieren. In der Folge kann auf Basis der Berechnungen des trainierten KNNs und produktionsbegleitender selektiver experimenteller Messungen gezielt aktiv in den Fügeprozess regelnd mittels Shimsumstellungen eingegriffen werden. Diese Justierungen der Anlage geschehen dabei pro Chargenänderung eines Einzelteiltyps (Innenteil, Beplankung oben/unten, Scharnierverstärkung links/rechts, Schlossverstärkung, Verschlussblech), also pro chargenidentischer Einzelteilkombination, um auf die damit verbundenen signifikanten, zunächst unbekanntem Änderungen/Schwankungen in den Einzelteilmaßhaltigkeiten maßbeeinflussend einwirken zu können und die Qualität der Zusammenbaumaßhaltigkeiten entsprechend der gewünschten Zielwerte (Maßabweichung in mm) positiv zu beeinflussen. Um die entsprechend notwendigen Daten aus dem laufenden Serienprozess zu erhalten, wird zu diesem Zweck eine schichtgenaue Stationszeitprognose bereitgestellt, die zum taktgenauen Aus- und Einschleusen von Einzelteilen und Zusammenbauten befähigt als auch zum taktgenauen Justieren der Spannelemente gemäß den Berechnungen des KNNs. Dabei kann die Qualität des modifizierten Fügeprozesses laufend über eine entsprechende Validierungstechnik überwacht werden. Im Idealfall befähigt die Methode folglich dazu, die Qualitätskriterien eines shimsbaren Fügeprozesses, hier also die Maßhaltigkeiten der Heckdeckelzusammenbauten, digital und numerisch zu objektivieren, Möglichkeiten zum aktiven, gezielten und konstruktiven Eingreifen bereitzustellen, und somit im besten Fall die Produktqualität zu stabilisieren und in Richtung einer Optimierung zu verbessern.

I Einleitung

1. Problemfelddefinition und Zielsetzung

1.1 Automobilbau heute

Die deutsche Automobilindustrie steht vor nie dagewesenen Herausforderungen. Höchste Qualitätsanforderungen sind in einem wachsenden globalen Wettbewerb bei steigenden Kosten und kürzeren Entwicklungszyklen umzusetzen [MOE 07]. Um auf dem Markt präsent zu bleiben erhöhen die Unternehmen die Anzahl der Fahrzeugmodelle, -derivate und Ausstattungsvarianten, um dem Kunden individuelle und individualisierbare Produkte zu liefern [MCK 05]. Mit steigenden Variantenzahlen geht eine Verkürzung der Planungs- und Absicherungszeit einher [KOE 04] (Abbildung 1.1).

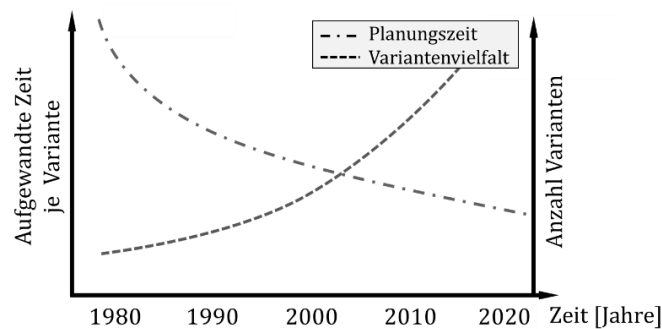


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung der zeitlichen Entwicklung der zur Verfügung stehenden Planungszeit je Variante durch steigende Variantenvielfalt (nach [KOE 04]).

Trotz verkürzter Planungszeit dürfen jedoch die Qualität und Kundenorientierung nicht vernachlässigt werden. Vor allem beim Kauf von hochpreisigen Konsumgütern, wie dem Automobil, spielen neben Emotionen vor allem die Qualitätsansprüche der Kunden eine wichtige Rolle [HAR 10]. Die Erfüllung der Qualitätsansprüche spiegelt sich in der Kundenzufriedenheit wider. Kundenzufriedenheit definiert sich als das Verhältnis von IST-Leistung (Qualität, die am Fahrzeug für den Kunden erlebbar ist) zu SOLL-Leistung (Qualität, die sich der Kunde wünscht) [ILZ 05]. Qualität beschreibt in diesem Zusammenhang die „Beschaffenheit (Produktmerkmale) einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen“ [DIN 55 350]. Qualität ist aber schon lange nicht mehr nur auf technisch überzeugende und einwandfreie Lösungen beschränkt, sondern wird viel mehr als ein Hygienefaktor¹ gesehen [HAR 10]. So veröffentlichte die Zeitschrift „auto, motor und sport“ im Qualitätsreport 2013 „Qualität ist kein Zufall“, dass ein zuverlässiges Fahrzeug an den präzisen Fugen der Karosserie zu erken-

¹ Hygienefaktoren verhindern Unzufriedenheit, steigern aber auf der anderen Seite nicht die Zufriedenheit.

nen sei [AMS 13]. Vielmehr geht es hier um eine Imagefrage der einzelnen Automobilhersteller, denn durch dieses „offensichtliche“ Qualitätsmerkmal wird dem Kunden suggeriert beim ersten Anblick seines Fahrzeugs die gesamtheitliche Qualität seines Fahrzeuges einschätzen zu können. Das Fugenmaß und damit die Maßhaltigkeit von Anbauteilen wie Türen und Klappen sind nicht zuletzt dadurch zu einem wichtigen Beurteilungskriterium für die Qualität eines Fahrzeugs geworden. Umso wichtiger wird in der Automobilindustrie der Ausbau des Qualitätswesens, das die Sicherstellung der Qualität fördert, dabei aber auch andere wichtige Grundsätze wie Kostenkontrolle, Automatisierungsgrad, kurze Taktzeiten und nachhaltiges Wissensmanagement nicht aus den Augen lässt.

1.2 Qualitätswesen morgen

Durch die sich ändernden Bedingungen im Automobilbau verändert sich auch das Qualitätswesen der produzierenden Unternehmen. Früher waren die entsprechenden Aufgaben vor allem geprägt durch Freigeben und Protokollieren. Diese verändern sich nun hin zu einem ganzheitlichen Blick auf den Produktlebenszyklus vom Entwurf über die Produktion bis hin zur Produktbewahrung [HAR 10]. Dabei ist es aus unternehmerischer Sicht zu riskant dem Endkunden die Qualitätsprüfung zu überlassen, denn Kunden fordern gerade im Automobilbau fehlerfreie Waren [NUF 10]. Aber auch die alleinige Bandendekontrolle ist aus wirtschaftlicher Sicht nicht zielführend. Je später Fehler entdeckt und behoben werden müssen, desto teurer wird es für den Hersteller – der Zusammenhang dabei ist exponentiell. Die so genannte „Verzehnfachungsregel“ beschreibt diesen Sachverhalt [WIT 93] (Abbildung 1.2).

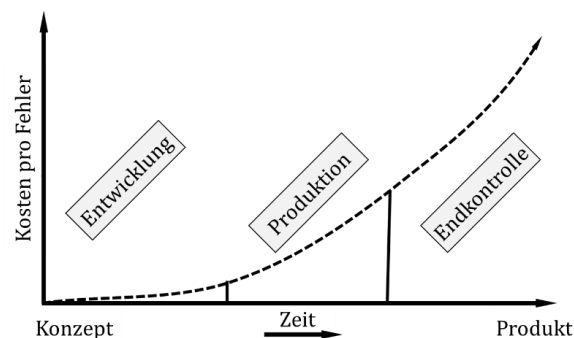


Abbildung 1.2: Schematische Darstellung der Verzehnfachungsregel (nach [WIT 93]).

Die Unternehmen der Automobilindustrie arbeiten gerade im Karosseriebau immer stärker auf die sogenannte „qualitätsgerechte Produktgestaltung“ bereits im Entwicklungsprozess hin [PET 04]. Das bedeutet, Produkte werden durch Erfahrungswissen verstärkt mit dem Fokus der einfachen und qualitätsentsprechenden Herstellbarkeit entwickelt. Um wettbewerbstauglich zu bleiben müssen darüber hinaus produzierende Unternehmen aber neben Produktinnovationen vor allem Prozessinnovationen voranbringen und einsetzen, da diese für den Markt meist unbekannt sind [GRO 08]. Durch steigende Digitalisierung gewinnen weitvernetzte qualitätssichernde Methoden mit Rückkopplungsmechanismen vor allem über mehrere Arbeitsschritte hinweg immer mehr an Bedeutung. In

der Automobilproduktion sind diese jedoch bisher eher wenig verbreitet. Wettbewerbsbedingt werden Unternehmen gezwungen Mess- und Prüfaufträge, trotz gewünschter „100%-Kontrolle“², kostengünstig durchzuführen [NUF 10], wobei hier aber auch dem leistbaren Prüf- und Messaufwand klare Grenzen gesetzt sind [GRA 02], [NUF 10]. Nicht zuletzt dadurch rücken Simulations- und Prognosetechniken immer mehr in den Fokus, um frühzeitig Aussagen über die zu erwartende Qualität zu erhalten und reagieren zu können.

1.3 Inhalt der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wird daher eine Methode zur zielgerichteten, werkerunabhängigen Justage eines Karosseriebauprozesses entwickelt (Kapitel 4). Hierbei geht es darum, reproduzierbar und digital objektiviert auf Basis neuronaler Netze das bestmögliche Fugen- und Versatzergebnis von Karosserie- zu Anbauteilen am Fertigfahrzeug zu erhalten. Ziel ist es durch eine Arbeitspunktoptimierung/Robustheitssteigerung³ der Anlage die Qualität der Endprodukte chargenweise produktionsseitig zu sichern. In der wissenschaftlichen Literatur existieren Veröffentlichungen zur Arbeitspunktoptimierung [NEU 13], [GER 14], [KEL 16], auch in Kombination mit neuronalen Netzen [LIE 05], [FRI 17], keine jedoch verbunden mit chargenweiser und quasi instantaner Justage. In der vorliegenden Arbeit werden die Aspekte für eine entsprechende Umsetzung am Beispiel einer Heckdeckelanlage eines deutschen Automobilherstellers entwickelt (Kapitel 5). Die Arbeit legt dar, anhand welcher Kriterien Messpunkte und Messpläne definiert und umgesetzt werden sollen. Für die Erstellung von Messplänen wird eine Stationszeitprognose zur Ermittlung der Verbauzeitpunkte der Chargen der einzelnen Einzelteiltypen entwickelt. Im Rahmen eines Bottom-Up Regelansatzes wird erläutert, welche Kriterien und Algorithmen zur Erzeugung eines neuronalen Netzes zur Berechnung von Justageempfehlungen einzusetzen sind. Zur Anwendung des entwickelten Regelkreises wird dann anhand der Stationszeitprognose und der zuvor erarbeiteten Kriterien mit Hilfe des neuronalen Netzes dargelegt, wie Justageempfehlungen gewonnen und umgesetzt werden können. Darauf aufbauend wird eine Validierungsmethodik hergeleitet, um die Qualität des entwickelten Regelungszyklus zu prüfen. Anschließend wird die entwickelte Methode inklusive Vorbereitungsphase, Regelungszyklus und Validierungsphase kritisch diskutiert und um Aspekte erweitert (Kapitel 6) sowie ein Resümee gezogen (Kapitel 7).

² 100%-Kontrolle beschreibt die Überwachung von 100 % aller Bauteile an 100 % aller im Vorfeld definierten Merkmale.

³ Robustheit beschreibt die Unempfindlichkeit des Prozesses gegenüber nicht exakt kontrollierbaren Eingangsgrößen [VDA 4].

II Grundlagen

2. Karosseriebau

Karosseriebauanlagen sind meist über Jahre hinweg gewachsene Anlagen, die sich mit dem Fortschritt der Technologie, wenn auch nur langsam, weiterentwickeln [BAR 88]. Grundsätzlich sind Karosseriebauanlagen dem Sondermaschinenbau zuzuordnen [PAU 13]. Vor allem unterscheiden sie sich untereinander stark in der Ausführung und im Hinblick auf die zu erledigende Aufgabe [RIE 03]. Im Folgenden wird auf die Gemeinsamkeiten, die aktuellen Gegebenheiten sowie auf die Trends im Automobilbau näher eingegangen.

2.1 Produktionsanlagen und Randbedingungen

Trotz herstellerspezifischer Design- und Ausstattungsunterschiede durchlaufen alle Fahrzeuge grundlegend dieselben Herstellungsprozesse vom Coil (aufgerollte Blechbahn) bis zum Fertigfahrzeug. Die wichtigsten Stationen sind das Presswerk, der Karosseriebau, die Oberflächenbehandlung (Lackierung) und die Endmontage (Abbildung 2.1). [VOL 12]

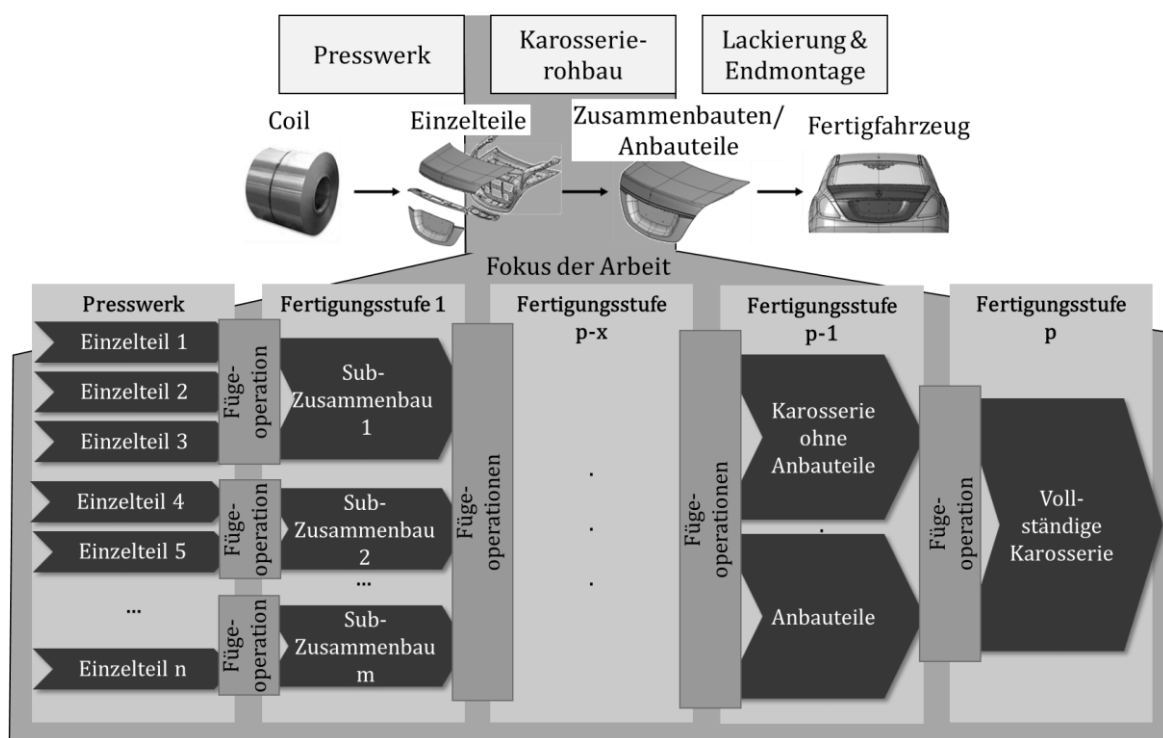


Abbildung 2.1: Automobilherstellungsprozess vom Coil zum Fertigfahrzeug.

Die einzelnen Abschnitte unterteilen sich in herstellerspezifische Produktionsanlagen und Logistikprozesse. Um Schichtwechsel, Störungen und Kommissionierung z.B. für die Oberflächenbehandlung auszugleichen sind die Produktionsbereiche durch Puffersys-

teme voneinander entkoppelt [ROS 08]. Gemäß der Verzehnfachungsregel (vgl. Kapitel 1.2) ist es günstig, den Fokus auf die maßgebenden Prozesse in der frühen Produktionsphase zu legen. Die maßhaltige⁴ Ausführung der Karosserie innerhalb der anlagenspezifisch gesteckten Qualitätsziele, welche abhängig von der Robustheit der weiterverarbeitenden Anlage sind, ist für die präzisen Fugen und Übergänge am Fertigfahrzeug von erheblicher Bedeutung, da die Karosserie die Referenz für fast alle Anbau- und Montageteile darstellt [LEU 10], [GRA 02]. Dazu gehört es, nach einer vorgeschriebenen Fügefolge in parallelen Strängen⁵, die Karosserie aus mehreren hundert Einzelteilen (ET) zu fertigen [BIR 13], sowie im Anschluss Anbauteile, wie Türen, Heckdeckel und Dach daran zu befestigen [BRA 11].

Jeder einzelne Herstellungs- oder Verarbeitungsprozess unterliegt Streuungen durch Parameterschwankungen aber auch durch Störeffekte und Umwelteinflüsse. Überlässt man nach Inbetriebnahme einen Prozess sich selbst, würde sich das Ausgabeprodukt des Prozesses, im Karosseriebau die Maßabweichungen des Zusammenbau des jeweiligen Fertigungsschritts, z.B. durch Werkzeugabnutzung in einer gewissen⁶ Zeit von den Zielwerten entfernen [LEO 87], [LIE 05]. Eine Prozesssteuerung oder -regelung ist einzusetzen, um die Zielerfüllung gewährleisten zu können [SIM 95]. Abbildung 2.2 zeigt einen Regelkreis nach [BRO 98] auf, der auf den Anwendungsfall Karosseriebau hin angepasst ist.

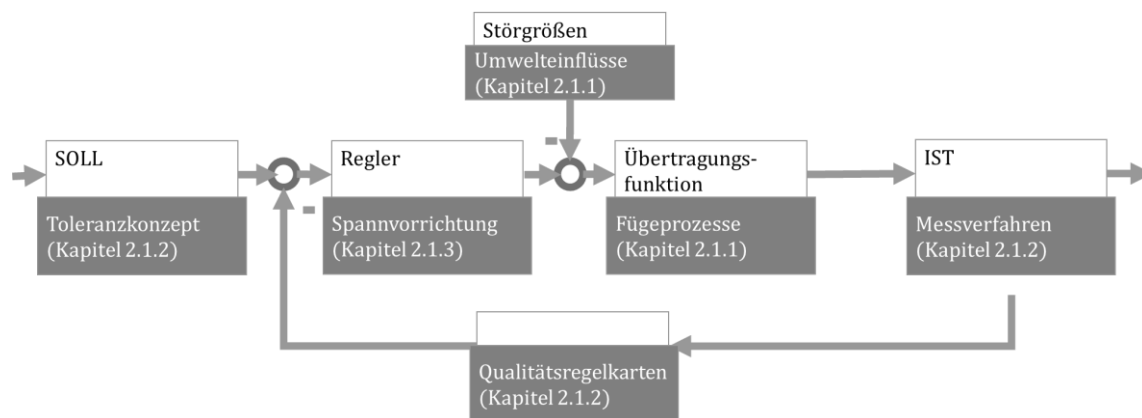


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung eines Regelkreises angepasst auf den Anwendungsfall Karosseriebau (nach [BRO 98]).

Die Ziel, also die *SOLL-Werte*, werden durch das im Entwicklungsprozess definierte Toleranzkonzept⁷ beschrieben. Die *Übertragungsfunktion* wird über die Fertigungsprozesse und deren maßbeeinflussenden Faktoren definiert. Die *IST*-Maße sind die Merkmale der

⁴ Maßhaltige Ausführung definiert sich als maximale geometrische Abweichung eines Merkmals vom Sollmaß innerhalb der definierten zulässigen Toleranzgrenzen des betreffenden Merkmals [KEF 15].

⁵ Dies geschieht in Deutschland überwiegend vollautomatisiert.

⁶ Stark abhängig vom betrachteten Prozess und z.B. Materialien

⁷ Toleranzkonzept: beinhaltet Aufbaureihenfolge, Referenzpunkten und zulässige Toleranzgrenzen für Qualitätszielerreichung für jedes Einzelteil bis hin zum Fertigfahrzeug.

real erzeugten Zusammenbauten (ZB), die über Sensoren vermessen und im Karosseriebau häufig über Qualitätsregelkarten (vgl. Kapitel 2.1.2) dokumentiert werden. Der Ausgabewert der Messeinrichtung ist dabei die geometrische Maßabweichung vom definierten Zielmaß inklusive Messunsicherheiten (vgl. Kapitel 2.1.2). Auf Basis dieser Messungen wird mittels Parameterveränderung in den Prozess als *Regler* eingegriffen. Auf Grund der Empfindlichkeit von Messanlagen gegenüber den Umgebungsbedingungen, wie Temperaturschwankungen, Vibrationen, Schmutz, usw., befinden sich die Messeinrichtungen oftmals entkoppelt von der Produktion in sogenannten Messhäusern, in denen stabile Messbedingungen gewährleistet werden (Klimatisierung, Schwingungsdämpfer, usw.).

2.1.1 Fügeprozesse im Karosseriebau

Im Karosseriebau sind vor allem fügende Fertigungsverfahren anzutreffen, wobei am häufigsten Falzen, Schweißen und Kleben vertreten sind⁸ [BOH 13]. Geringe Variantenvielfalt und höchster Automatisierungsgrad⁹ zeichnet dabei die Fertigungsbereiche des Karosseriebaus aus [KRO 09]. Einzig Transportprozesse und Einlegevorgänge der Einzelteile erfolgen teilweise noch in den langjährig gewachsenen Hallenkonzepten manuell [KRO 09].

Gemäß Abbildung 2.1 werden vorgelagert zum Karosseriebau zur Einzelteilherstellung gewickelte Blechrollen (engl.: Coils) an das Presswerk angeliefert. Diese werden zu Platten geschnitten und in großen Werkzeugen umgeformt. Alle Einzelteile einer Abpressung, also zwischen zwei Werkzeugwechseln, nennen sich zusammen Charge [KRO 09]. Die Coils unterscheiden sich je nach Abpressauftrag in Länge, Breite, Materialdicke und -eigenschaften (entsprechend der vergebenen Liefervorschriften). Gödel et al [GOE 10] stellen heraus, dass vor allem die Prozessparameter, wie Materialkennwerte der Werkstoffe oder auch die Grundbeölung ab Walzwerk bereits maßgeblichen Einfluss auf die erzeugten Einzelteile im Presswerk haben. So haben gerade bei kritischen Umformprozessen die mechanischen Eigenschaften¹⁰ des Materials einen entscheidenden Einfluss [NEU 13]. Dies ist auch bereits bei der Lagerung der Coils zu beachten. Beispielsweise Aluminium-Coils beginnen zu altern, oder die Grundbeölung verläuft und führt zu Qualitätsproblemen [PET 06]. Daher sind minimale Liefer- und Lagerzeiten anzustreben. Ziel in der Praxis ist es, das Presswerk nach dem „Just-in-Time Prinzip“ zu beliefern, also möglichst die Coils unmittelbar nach Anlieferung weiterzuverarbeiten.

Die Einflüsse des Serienumformprozesses im Presswerk (Einzelteilherstellung/Eingangsgröße für den Karosseriebau) lassen sich nach Hora et al [HOR 11], Neumann [NEU 13] aber auch grob nach Leuschel [LEU 10] in drei Gruppen einteilen: Prozessparameter, Anlagenparameter und Zustandsgrößen. Dabei beschreiben die Prozessparameter z.B. die Coilbeschaffenheiten. Die Anlagenparameter umfassen die Pressen- und Werkzeugeigenschaften. Die Zustandsgrößen deuten auf die Temperaturen hin, die sich zeitabhängig

⁸ Weitere Verfahren, die hier jedoch nicht betrachtet werden, sind z.B. Schrauben, Stanzen und Nieten.

⁹ in Hochlohnländern, und bei Großserienherstellern

¹⁰ wie z.B. die Streckgrenze

über den Abpressvorgang verändern können. Je nach Beschaffenheit variieren diese Einflüsse stark, leisten unterschiedliche Beiträge [THA 02] und haben damit Einfluss auf die Maßhaltigkeit der abgepressten Einzelteile, die dann wiederum die Eingangsgröße für den Karosseriebau bilden.

Jedoch weisen nicht nur die Einzelteile maßliche Streuungen auf, auch die folgenden Fertigungsprozesse im Karosseriebau sowie die Einspannvorrichtungen in den geometriefestlegenden Stationen¹¹ unterliegen Prozessstreuungen [JOR 12], [KLE 06], welche in starker Wechselwirkung mit den Einzelteilstreuungen [MEY 12] das Fügeergebnis beeinflussen [KLE 06], [BUS 07]. Die Fügesituationen werden verändert durch entstehende Eigenspannungen im Bauteil, erzeugt durch die Einspannung, sowie durch Positionsabweichung des Bauteils z.B. durch fertigungsbedingte Riefen oder andere Fehlstellen genau an Ausrichtpunkten [BOH 13].

Durch Schweißen entsteht beim Fügen eine stoffschlüssige Verbindung mittels Aufbringen von Wärme und/oder Kraft zwischen zwei oder mehr Blechen mit oder ohne Zusatzwerkstoff [DIN 1910-100]. Eine örtlich begrenzte Zone wird dafür kurz oberhalb der Schmelztemperatur erhitzt, damit das Material der Fügepartner verschmilzt. Beim Herunterkühlen entsteht eine dauerhafte stoffschlüssige Verbindung [DEU 95]. Neben der gewollten Verformung kann es durch die eingebrachte Wärme auch in anderen Bauteilzonen zu Bauteilveränderungen, dem sogenannten Verzug, kommen. Diese Effekte sind vom eingesetzten Schweißwerkzeug und dem Wärmeleitkoeffizienten des Werkstoffs abhängig [DEU 95], [DIL 05], [POP 05]. Um möglichst wenig Eigenspannungen und dadurch ungewollt verursachte Verformungen in den Fügepartnern durch die Wärmezufuhr zu erzeugen, wird oftmals eine „schwimmende“ (also leicht bewegliche) Lagerung in den geometriefestlegenden Fügestationen verwendet, um den geschweißten Zusammenbau kraftfrei aus der Schweißvorrichtung entfernen zu können [DEU 95]. Durch Leichtbaustrategien im Automobilbau sind Materialien wie Aluminium interessant [KRO 09]. Aluminium hat aber einen recht hohen Wärmeleitkoeffizienten¹² von $2,3 \frac{W}{cm \cdot K}$ im Gegensatz zu Stahl mit nur etwa $0,75 \frac{W}{cm \cdot K}$. Durch die geringen Bauteildicken im Karosseriebau breiten sich die Schweißzonen in den Aluminiumbauteilen schneller und weiter aus [DIL 05], was zu großflächigem Verzug führen kann. Laserschweißprozesse für Außenhaut- und Anbauteile sind im Karosseriebau mittlerweile stark verbreitet und erleben einen immer weiteren Aufschwung durch die verschiedenen positiven Eigenschaften¹³ [MIC 11]. Die Wärmeeinflusszonen sind durch eine starke Fokussierung des Laserstrahls so gering wie möglich gehalten, um den Verzug des Bauteils zu minimieren [DIL 05]. Insbesondere ist dies wichtig bei Sichtschweißnähten, da sonst unansehnliche Schweißränder entstehen.

¹¹ Geometriefestlegende Station: Vorrichtung in Fügestation mit Spannelementen, in denen die Bauteile während des Fügevorgangs in ihrer Position fixiert sind.

¹² Wärmeleitkoeffizient: je größer der Wärmeleitkoeffizient desto schneller die Ausbreitung der Wärme im Material und damit der Schweißzone

¹³ Laserschweißen hat Vorteile gegenüber anderen Schweißverfahren, wie z.B. einseitig ausreichende Zugänglichkeit sowie hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten

Weiterhin können Laserschweißanlagen mit einer Nahtnachführung ausgestattet werden. Dabei wird der Laser im Prozess situationsgenau nachgeregelt. Als Sensor dient ein optisches Triangulationsmessverfahren oder der benötigte Zusatzdraht, der kraftgeregelt auf die Schweißstelle zu drücken ist (Abbildung 2.3). Wird eine Abweichung im Bauteil festgestellt, wird der Wegverlauf des Schweißwerkzeugs angepasst. Für eine gleichbleibende Strahlqualität wird die Fokussierung des Laserstrahls angepasst. [SCA 09]

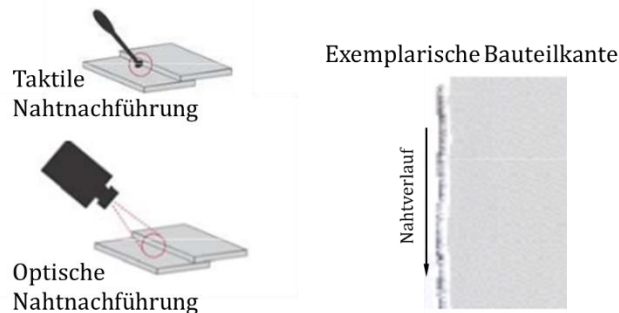


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der taktilen und optischen Nahtnachführung für Schweißprozesse [SCA 09]

Darüber hinaus wird Falzen für alle sichtbaren Kanten und Abschlüsse, vor allem an fugenbildenden Anbauteilen, wie Türen und Klappen, eingesetzt [BIR 13]. Das Falzen ist ein Fügeverfahren aus der Gruppe der Formschlussverfahren (Abbildung 2.4). Durch umlaufendes Umformen des abstehenden Flansches des einen Bauteils um den Flansch des anderen Bauteils entsteht eine dauerhafte Verbindung [BIR 13]. Es wird überwiegend als Hybridverfahren „Klebe-Falzen“ ausgeführt [RIE 03]. In [JON 06], [KUK 13], [BEH 10] und [BIR 13] werden die unterschiedlichen Falzformen und -prozesse ausführlich erläutert. Im Automobilbau wird überwiegend das Rollfalzen angewandt. Dieses ist das flexibelste Falzverfahren, da es ein inkrementelles Verfahren ist. Es erreicht, im Gegensatz zu anderen Falzprozessarten, in mehreren Schritten die gewünschte Falzform. Die Falzung erfolgt mittels einer Rolle, die entlang des Falzflansches fährt und den Flansch des Außenhautbauteiles umbiegt [BIR 13].

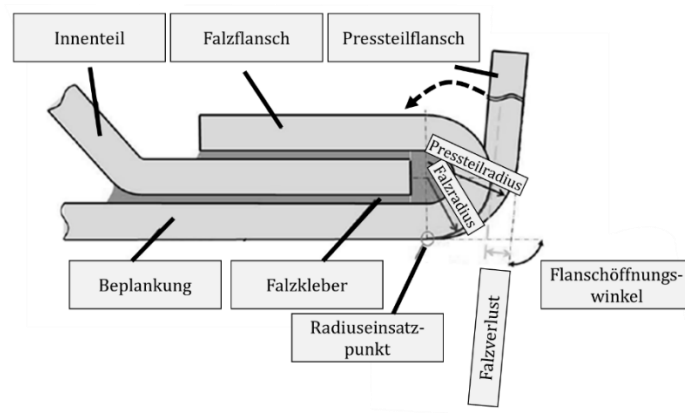


Abbildung 2.4: Schematische Schnittbild eines Standardfalzes (nach einem internen Dokument der Daimler AG)

Um Fehlstellen in der Oberfläche auszugleichen und gegenseitige Anlage der Bauteile zu vermeiden, wird Stützkleber auf dem Trägerteil/Innenteil (dem später nicht sichtbaren Fügepartner) aufgetragen. Parallel wird auf dem Außenhautbauteil der Falzkleber aufgetragen, der den Falzrand abdichten wird und gegen Korrosion schützt [BIR 13]. Der Kleber sollte sich zwischen Falzflansch, Innenteil und Beplankung gut einbetten und nicht herausquellen aber auch keine Leerstellen ausbilden. Die Klebebereiche werden nach dem Falzen punktuell erwärmt, um den Kleber zu härten und die endgültige Position der Teile zueinander zu fixieren. Der restliche Kleber härtet mit der Zeit aus. Dabei sind Klebeigenschaft und Menge, sowie die Position der Kleberaupe entscheidend für die sich ausbildende Maßhaltigkeit und sollten durchgängig überwacht werden [HES 96]. In der Falzstation wirken durch die Spannelemente und die Falzrollen hohe Kräfte auf die Bauteile, die zu plastischen Verformungen führen. Dabei spielt die Ausrichtung der Bauteile in den geometriefestlegenden Stationen eine entscheidende Rolle. In [BIR 13] werden die unterschiedlichen Spannungsverteilungen bei Be- und Entlastung der Werkzeuge beschrieben.

Die einzelnen angesprochenen Einflussfaktoren werden in [HU 01] und [LEU 10] thematisiert und lassen sich wie in Tabelle 1 dargestellt kategorisieren.

Tabelle 1: Einflussfaktoren auf die Maßhaltigkeit bei fügenden Fertigungsverfahren.

Einflussfaktor	Ursache (Beispiele)	Wirkung	Stellhebel
Bauteileigenschaften ab Presswerk / Zusammenbaueigenschaft aus Vorgängerstation	<ul style="list-style-type: none"> • Geometrische Maßabweichung des Einzelteils von der Idealgeometrie • Geometrische Maßabweichung des Subzusammenbaus von der Idealgeometrie • Eigenspannungen in den Bauteilen bzw. Subzusammenbauten durch Festlegung der Fügefolge 	<ul style="list-style-type: none"> • Positionsabweichung der Bauteile beim Fügen • Veränderung der benötigten Spannkraft • Veränderung der Rücksprungkräfte 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualität der Bauteile verbessern, zulässige Bauteiltoleranzen einschränken -> es entsteht ggf. Ausschuss
Anlagenbeschaffenheit	<ul style="list-style-type: none"> • Riefen oder Schmutz auf Spannfläche • Abweichung der Falzbacken 	<ul style="list-style-type: none"> • Positionsabweichung der Bauteile beim Fügen 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualität der Vorrichtungen verbessern, zulässige Vorrichtungstoleranzen einschränken -> regelmäßige Wartung notwendig
Fügeprozess	<ul style="list-style-type: none"> • Verschmutzung der Fokussieroptik beim Laserschweißen 	<ul style="list-style-type: none"> • Abweichung der festgelegten Prozessparameter 	<ul style="list-style-type: none"> • Rechtzeitiger Austausch von ausgedienten Werkzeugen
Umwelteinflüsse	<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturschwankungen in der Produktionshalle 	<ul style="list-style-type: none"> • Veränderung der Bauteile und der Anlagen 	<ul style="list-style-type: none"> • Gleichmäßige Temperatur halten

Darüber hinaus spielen nach Rostami Mehr [ROST 14] vorgelagerte Transportprozesse sowie das Einlegen ins Magazin keine Rolle für die Maßhaltigkeit des Zusammenbaus. Auch die Beschleunigungs- und Ablegekräfte der Roboter sind zu vernachlässigen [ROST 14]. Das Ablegen in den Fügestationen wird immer mit Prozesskräften durchgeführt, die stets geringer sind als die Kraft, die für eine plastische Verformung der Bauteile notwendig ist. Jedoch auf die Genauigkeit des Entnehmens und Ablegen der Bauteile hat die Aufwärmphase der Roboter einen Einfluss. Als Richtwert wird von Werkern für diesen Zeitraum in der Regel etwa 30 Minuten angegeben.

2.1.2 Toleranzkonzept, Messverfahren und Qualitätsregelkarten

Die Zielkorridore der geometrischen Maßhaltigkeiten der Zusammenbauten entsprechen den SOLL-Vorgaben eines Regelkreises (vgl. Abbildung 2.2). Prozessstreuungen spiegeln sich in Bauteilen und Zusammenbauten entsprechend ihrer konstruktiven Beschaffenheit wider [BOH 98]. Unter Zuhilfenahme der Prozesskenntnisse gilt es die Fehlerfortpflanzung durch kumulierte Toleranzketten im Karosseriebau zu ermitteln [LEU 10]. Durch Methoden der Toleranzrechnung, wie z.B. Toleranzanalyse und Toleranzsynthese [GER 03], lassen sich so die einzuhaltenden Toleranzen in den Zusammenbauten bis hin zu den Fugenmaßen im Fertigfahrzeug bestimmen. Die einzuhaltenden Toleranzen werden in einem Toleranzkonzept protokolliert, welches jeweils aus der Aufbaureihenfolge, dem Referenzsystem (Ausrichtelementen) und verschiedenen darauf bezogenen Toleranzvorgaben für bestimmte Merkmale, wie Flächen, Ebenheiten, Lochpositionen, usw. besteht [BOH 13]. Typische Größenordnungen von Toleranzangaben für geometrische Merkmale im Karosseriebau liegen unterhalb von einem Millimeter [LEU 10]. Abbildung 2.5 zeigt eine Auswahl an Merkmalen, die in der vorliegenden Arbeit relevant sind – dazu gehören Beschnitt-, Flächen- als auch Lochmessungen und im weiteren Verlauf der Produktion auch Fugen- und Versatzmessungen.

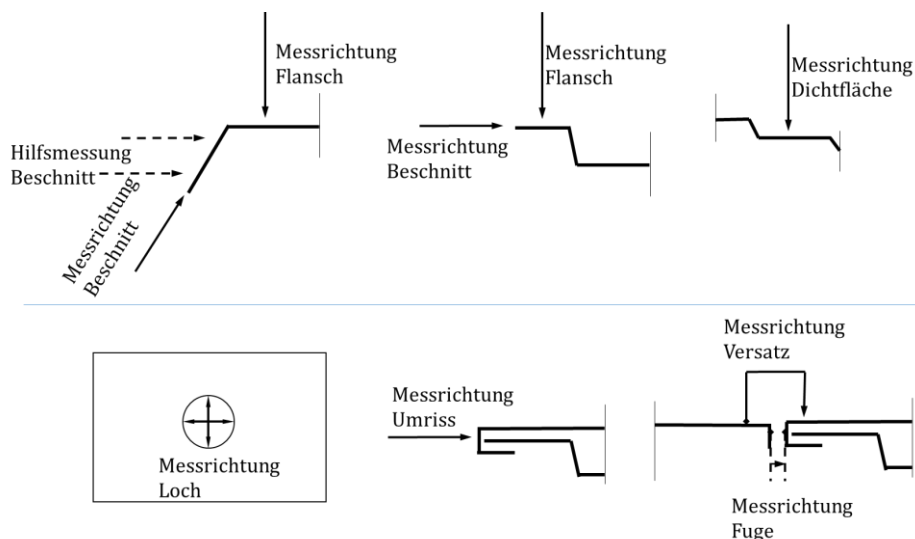


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung von Merkmalsmessungen im Karosseriebau.

Flächenmessungen können als Flansch- aber auch als Dichtflächenmessungen auftreten. Beschnittmessungen benötigen teilweise Hilfsmessungen, die den Abstellwinkel des Falzflansches bestimmen, um daraus die Länge des Falzflansches durch eine dritte Messung zu ermitteln. Für die Lochmessungen sind je nach Beschaffenheit zwei unterschiedliche Methoden verbreitet. Der Messtaster (taktile Messmaschine) fährt in das Loch hinein und fährt den Rand des Loches einmal in zwei orthogonal zueinander liegenden Richtungen an und ermittelt daraus rechnerisch die Koordinaten der Lochmitte. Ist eine Schweißmutter im Loch verpresst muss zunächst ein Hilfselement (Halbkugel) eingeschraubt werden. Das Hilfselement wird aus fünf Anfahrtsrichtungen angefahren, um rechnerisch den Mittelpunkt des Loches ermitteln zu können.

Um die Reproduzierbarkeit von Messungen sicher zu stellen werden für jede Einzelteilart Referenzstellen definiert [BIR 13]. Die Referenzstellen lassen sich nach dem 3-2-1 Prinzip (Abbildung 2.7) durch Einschränkung der translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade (Abbildung 2.6) mit Spannelementen (vgl. Abbildung 2.9) bestimmen. Dazu muss das Bauteil auf einer gedachten Ebene (die Primärebene) aufliegen. Als Primärebene ist die Ebene auszuwählen, in der das größtmögliche Dreieck mit drei Referenzpunkten bzw. Spannpunkten selber Richtung aufzuspannen ist. Dies dient dazu das Risiko des Verkippens des Bauteils möglichst gering zu halten, wodurch sich für die primäre Ebene hauptsächlich Flächenspannelemente eignen. Mit zwei weiteren Referenz- bzw. Spannpunkten in einer weiteren Koordinatenrichtung lässt sich orthogonal die Sekundärebene, sowie mit einem weiteren Referenz- bzw. Spannpunkt in der dritten Koordinatenrichtung jeweils orthogonal die Tertiärebene aufspannen [BOH 13], [BIR 13], wodurch die Verschiebung des Bauteils verhindert wird. Hierfür eignen sich Flächen-, Kanten- als auch eine Rund- und Langlochfixierung.

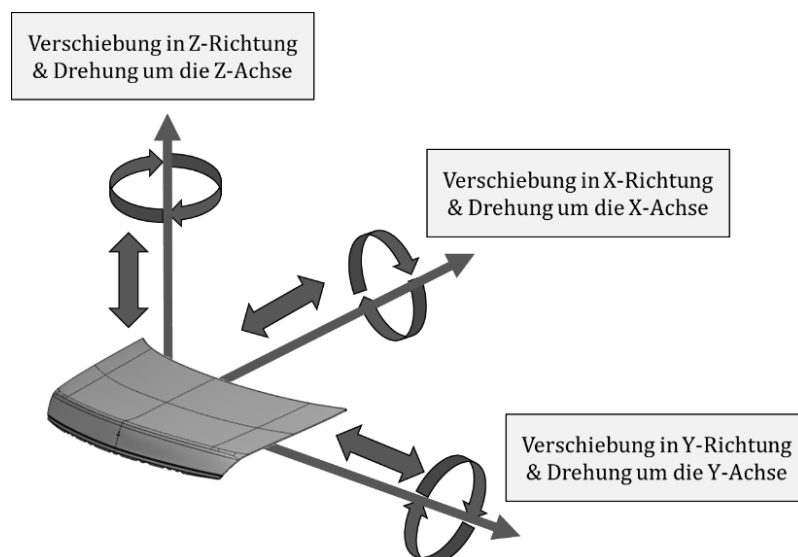


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung der Freiheitsgrade eines Körpers im Raum (nach [BOH 13]).

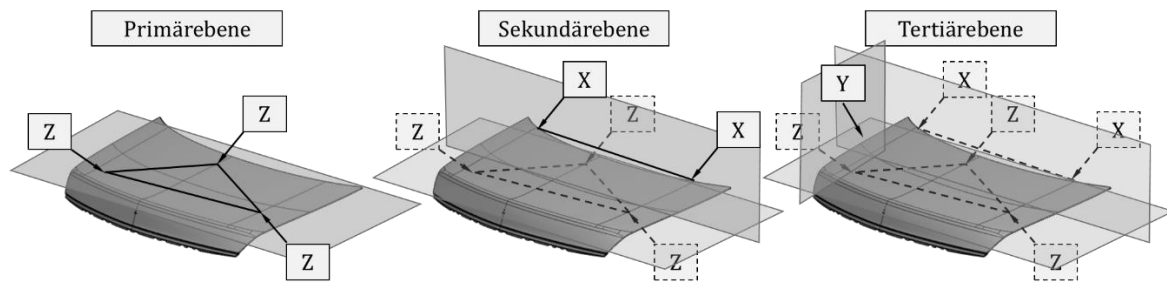


Abbildung 2.7: Exemplarische Darstellung des 3-2-1 Prinzips.

Flexible Bauteile, wie dünnwandige Bleche, werden zumeist statisch überbestimmt eingespannt, um undefinierte elastische Verformungen zu vermeiden (Gewährleistung der Reproduzierbarkeit der Messung). Das bedeutet, dass zu den sechs notwendigen Spannstellen Hilfsausrichtpunkte gesetzt werden, die das Bauteil zusätzlich im Raum, bzw. in den Vorrichtungen, fixieren [BOH 13].

Auf Basis der erstellten Referenzpunkte können die Zieltoleranzen eindeutig definiert und die Merkmale reproduzierbar gemessen und ausgewertet werden. Über eine Fertigungsstufe hinaus ist jedoch eine Nutzbarkeit der Messergebnisse nur gewährleistet, wenn sich Referenzstellen in den nächsten Prozessschritt weiter vererben [BAR 88].

Zur Aufnahme der IST-Maße, dem Output des realen Prozesses (inkl. Messunsicherheiten), also den real gefertigten Zusammenbauten oder Karosserien mit ihren Abmessungen inklusive aller eingeflossenen Fertigungsabweichungen, sind sowohl taktile als auch optische Messmaschinen im Karosseriebau verbreitet. Bei der taktilen Messtechnik wird das Merkmal mit einem Messtaster angefahren und bei Berührung die Abweichung zum virtuellen Soll-Zustand berechnet. Bei der optischen Messtechnik erfüllt diese Aufgabe ein Laser, der berührungslos den Abstand der Oberfläche zum Laser misst und daraus die Ist-Lage des Merkmals zur Soll-Lage berechnet [KEF 15]. Der von der Messmaschine ausgegebene Wert entspricht jedoch praktisch nie dem „wahren Wert“ eines gemessenen Merkmals, da auch der Messprozess selbst abweichungsbehaftet ist [DIN 1319-1]. Durch regelmäßiges Kalibrieren der Messsensoren lassen sich die bekannten, systematischen Messabweichungen durch eine Offsetbildung weitestgehend eliminieren. Der Einfluss der zufälligen Messabweichung kann über eine Erhöhung der Stichprobenzahl reduziert werden [MOS 06]. Die unbekannte systematische Messabweichung kann hingegen nicht ausgeglichen werden [KEF 15]. Die Wiederholgenauigkeit¹⁴ von Messanlagen im Karosseriebau¹⁵ beträgt bei der taktilen Messung etwa 0,01 mm. Für optische Messungen, die sich besser auf Grund der kurzen Taktzeit in die Produktionslinien, als sogenannte Inline-Laser-Messanlagen, integrieren lassen [KEF 15], sind oft Schweißroboter mit einem Lasersensor im Einsatz, da diese im Preis-/Präzisions-Verhältnis viele Vorteile bieten. Sie haben jedoch nur eine herstellerseitig garantierte Genauigkeit von +/- 0,15 mm. In der

¹⁴ Die Wiederholgenauigkeit ist definiert als die reine Messunsicherheit der Messmaschine, ohne weitere Einflüsse, wie z.B. Werkereinfluss.

¹⁵ Beispielsweise Horizontalmessarm-Anlagen

Praxis zeigt sich aber bei warmgefahrenen Anlagen eine deutlich bessere Wiederholgenauigkeit. Üblicherweise sind sie so eingesetzt, dass sie eine Wiederholgenauigkeit unter 10 % des Toleranzbandes erreichen. Neben der Wiederholgenauigkeit der Messanlage selbst fließen noch weitere Faktoren in die Messunsicherheit ein, die gesamtheitlich dann die (Mess-)Prozesswiederholgenauigkeit PWG (auch Messmittelfähigkeit) für den jeweiligen Messumfang beschreiben. In [KEF 15] werden mit der 6M-Methode die wichtigsten Faktoren zur Bestimmung der Messmittelfähigkeit benannt: Milieu (Umwelt), Methode (Messart), Mensch (manueller Einfluss, z.B.: Einlegen der Bauteile in Vorrichtung), Messen (Messunsicherheit), Material (Oberfläche, z.B. bei optischer Messtechnik: spiegelnde Oberfläche) und Maschine (Zustand, Spannposition). Nach dem Verband der Automobilindustrie (kurz: VDA) muss für die Ermittlung der (Mess-)Prozesswiederholgenauigkeit dasselbe Bauteil mindestens 20 Mal in der Messvorrichtung vermessen werden, sowie von zwei unterschiedlichen Werkern jeweils mindestens fünf Mal neu eingelegt und vermessen werden. Die über die Messwerte je Merkmal ermittelte Standardabweichung σ ist die Messmittelfähigkeit [VDA 5]. Abbildung 2.8 veranschaulicht, dass ein Messwert von der Toleranzgrenze mindestens 3σ entfernt sein muss, um eine 99,73 % sichere Aussage über die Lage des wahren Messwerts zur Toleranzgrenze geben zu können. Nach der „goldenen Regel der Messtechnik“ [KEF 15], [GUS 14] ist als Richtwert hierfür ein Verhältnis von Messunsicherheit zu Toleranzbandbreite¹⁶ von weniger als 10 % anzustreben. Zwischen 10 und 30 % gilt der Messaufbau für die Anwendung als noch akzeptabel, über 30 % jedoch als nicht mehr geeignet [BOH 13].

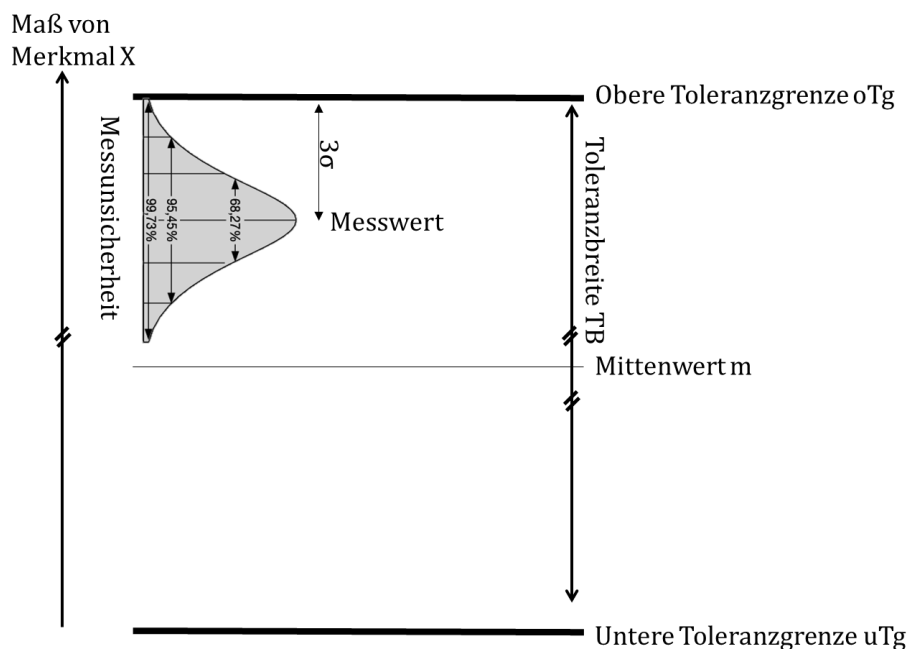


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung des Einflusses der Messunsicherheit auf die Aussagequalität des Messwertes zu den Toleranzgrenzen.

¹⁶ Toleranzband ist definiert als Abstand von unterer zu oberer Toleranzgrenze (siehe Abbildung 2.9).

Zum SOLL-IST-Vergleich von Merkmalen der produzierten Einzelteile oder Zusammenbauten dienen im Karosseriebau Qualitätsregelkarten (Abbildung 2.9) [KEF 15]. Dabei werden Messergebnisse eines Merkmals einer fortlaufenden Messreihe von Bauteilen graphisch dargestellt. Der eingetragene Wert kann der Mittelwert einer Stichprobe sein oder der jeweilige Wert des gemessenen Merkmals an einem Bauteil selbst. In regelmäßigen Abständen werden Messungen aufgenommen und eingetragen. Die obere und untere Toleranzgrenze ist im Toleranzkonzept des jeweiligen Merkmals definiert. Der Abstand von Warn- und Eingriffsgrenze dazu wird individuell auf das Merkmal angepasst und hängt maßgeblich von der Steuerbarkeit des Prozesses ab [BOH 13]. Die Entscheidungsgrundlage dazu bilden verschiedene Qualitätstechniken (vgl. Kapitel 2.2.2).

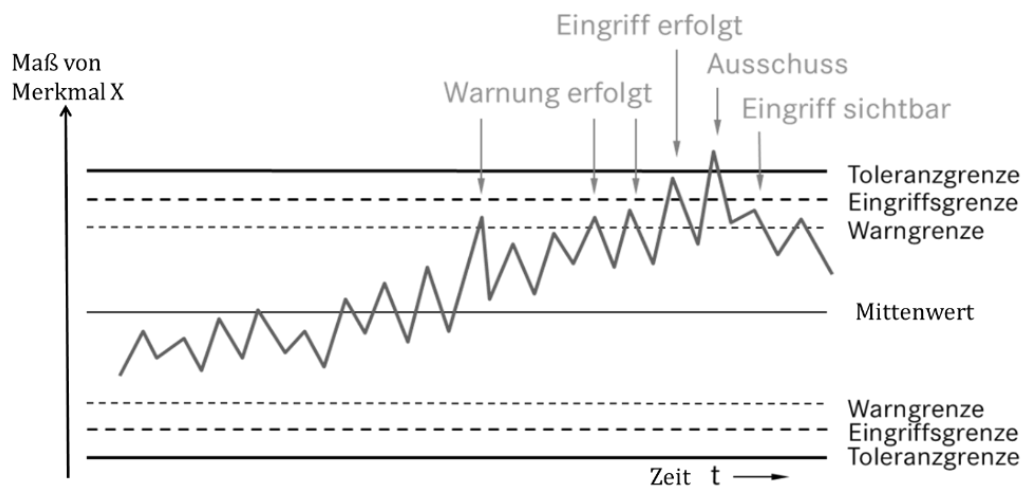


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung einer Qualitätsregelkarte mit exemplarischem Regelverlauf.

2.1.3 Prozesssteuerung mittels geometriefestlegenden Stationen

Der *Regler* in einem Regelkreis trifft die Entscheidung zum Beeinflussen der Übertragungsfunktion und nutzt dazu die Veränderbarkeit von Regelparametern im Prozess um eine bestmögliche Zielerreichung zu gewährleisten [BRO 98]. Trotz hohem Automatisierungsgrad während der Fertigung obliegt die Auswertung der Messdaten und der daraus resultierenden Entscheidung zum Regeleinsatz dem Werker. Entscheidungsgrundlage bilden dazu verschiedene Qualitätstechniken (vgl. Kapitel 2.2.2). Junker [JUN 97] weist darauf hin, dass dabei jedoch immer die Qualifikation (Erfahrung, Selbstständigkeit, ...) der Werker die Produktivität und Produktqualität bestimmt. Wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben beeinflussen viele Faktoren einen Fertigungsprozess im Karosseriebau. Neben Prozessparametern wie Lasereigenschaften und Klebemenge stehen vor allem die geometriefestlegenden Stationen im Fokus bei Eingriffen in den Prozess. Abbildung 2.10 zeigt beispielhaft eine mögliche Ausführung einer solchen Station.

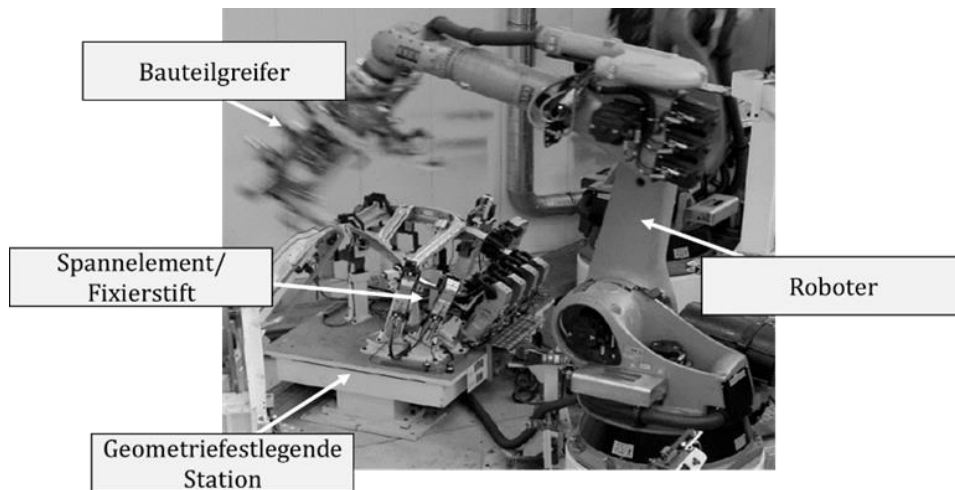


Abbildung 2.10: Geometriefestlegende Station im Karosseriebau inkl. Roboter in Bewegung (nach [FRI 12]).

Nach Riedel [RIE 03] findet während des Fügens in diesen Stationen die Festlegung der endgültigen Bauteilgeometrie (abgesehen vom Springbackeffekt¹⁷) statt. Obwohl sich die geometriefestlegenden Stationen in ihrem Erscheinungsbild Hersteller- und Bauteilspezifisch unterscheiden, haben sie gemeinsam, dass die jeweiligen Koordinaten der Hauptspannstellen mit den Referenzpunkten aus dem Toleranzkonzept übereinstimmen (vgl. Kapitel 2.1.2). Dies dient dazu ein reproduzierbares Spannergebnis zu liefern [KRA 14]. Abbildung 2.11 zeigt eine schematische Darstellung von möglichen Spannelementen in einer geometriefestlegenden Station. Ein Fixierstift ist ein Spannelement, das sowohl die Bewegung des Bauteils, abgesteckt in ein Rundloch, durch Formschluss gleichzeitig in zwei Richtungen einschränken kann als auch abgesteckt in einem Langloch das Bauteil in nur einer Richtung einschränkt [BOH 13]. Der Flächenspanner fixiert das Bauteil durch Kraftschluss in seiner Lage.

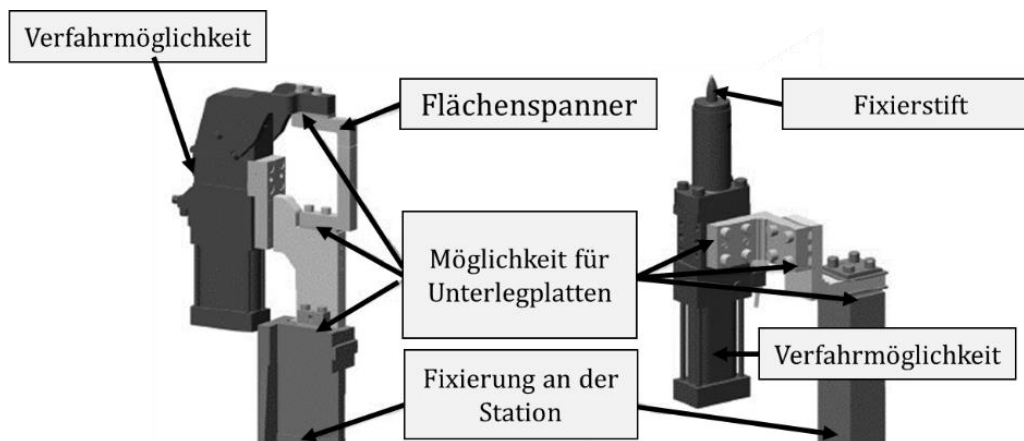


Abbildung 2.11: Schematische Darstellung möglicher Ausführung von Spannelementen (links: Flächenspanner; rechts: Fixierstift) (nach [FRI 12]).

¹⁷ Rückfedern nach Lösen der Spannsituation

Wie oben beschrieben verändern sich die geometrischen Maßabweichungen der Zusammenbauten zur Sollgeometrie unter anderem durch Positionsabweichung der Bauteile in den Fügevorrichtungen. Im Rahmen von Justagevorgängen¹⁸ der Spannvorrichtungen (Positionsänderung) in den geometriefestlegenden Stationen, auch „Shimmen“ genannt, wird sich die gezielte Positionsabweichung der Bauteile zu Nutze gemacht. In langjährig gewachsenen Anlagen erfolgt die Justage meist manuell mit Unterlegplatten (engl.: Shim). Grundlegend für die flächendeckende Verbreitung ist, dass mit dieser altbewährten Technologie eine lange Betriebsdauer und damit einhergehend verhältnismäßig geringe Investitionskosten (reine Instandhaltungskosten zur Wiederaufbereitung für Folgeprodukte) bei gleichzeitig hohen Steifigkeiten der Vorrichtung erreicht werden. Die manuellen Eingriffe erfordern jedoch aus Sicherheitsgründen in den ansonsten automatisierten Fertigungsanlagen bei jeder Justage Standzeiten der Anlage. Alternativ dazu haben Fritzsche et al [FRI 12] ein elektrohydraulisches Antriebssystem für extern ansteuerbare Spannvorrichtungen mit geringem Bauraum entwickelt. Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass die Justagezeit sich minimiert sowie eine stufenlose Justage möglich ist.

2.2 Anmutung und Präzision

Um auf dem Automobilmarkt präsent zu bleiben müssen die Automobilhersteller die Produktion an die Anforderungen der Kunden anpassen. Anmutungsqualität und Präzision in der Ausführung sind von Junker [JUN 97] in diesem Zusammenhang genannte Begriffe, die bei der steigenden Automatisierung eine Rolle spielen sollten. Damals wie heute ist das Einbringen innovativer Lösungen notwendig, damit die Produktion den aktuellen Anforderungen gerecht wird. 1997 lag noch im Fokus z.B. die heutzutage nicht mehr wegzudenkende Laserschweißtechnik (siehe Kapitel 2.1.1) und Inline-Laser-Messsysteme (siehe Kapitel 2.1.2) zur Prozessüberwachung zu installieren [JUN 97]. Im Kontrast dazu stehen heute, durch die steigende Komplexität der Produkte und den damit komplexer werdenden Produktionsschritten, Innovationen für die Produktionstechnologie, wie z.B. die vernetzte Datenverarbeitung im Vordergrund [BAU 14].

2.2.1 Entwicklungsseitige Optimierung der Qualität

Im Karosseriebau sind die Fugen und der Versatz zwischen Karosserie und Anbauteilen die kundenrelevanten Ausgangsgrößen (vgl. Kapitel 1). Die Erfüllung der Zielwerte ist während des Entwicklungsprozesses bereits anzustreben und über Qualitätstechniken im Produktionsprozess sicherzustellen. Vor allem im Bereich der qualitätsgerechten Produktentwicklung lässt sich bereits konstruktiv zur Anmutungsqualität beitragen. Der mittlerweile ausgemusterte Tropfenfalz (Abbildung 2.12, rechts) lässt beispielsweise die Fuge an einem Fahrzeug deutlich größer wirken als der Standardfalz (Abbildung 2.12, links), obwohl die tatsächliche Fuge bei beiden Falzbeispielen identisch ist. Hier wird deutlich, dass der Radiuseinsatzpunkt das wahrgenommene Fugenmaß beeinflusst. Kleinere Falzradien erscheinen optisch als kleinere Fugen [KUK 13].

¹⁸ im Zehntelmillimeterbereich

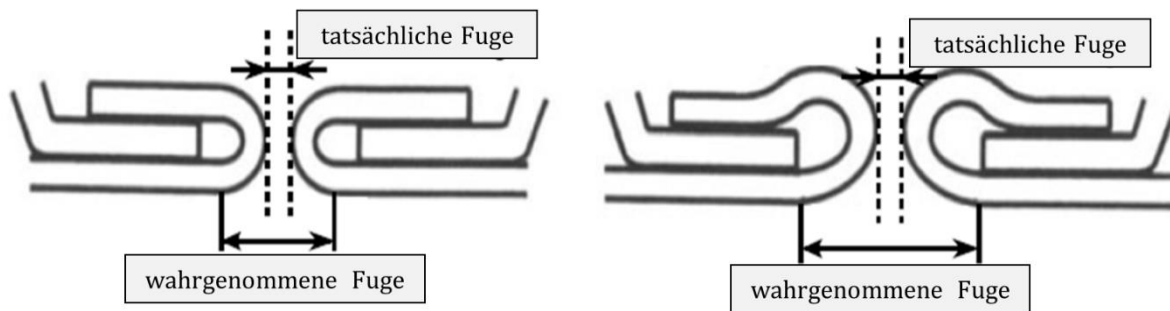


Abbildung 2.12: Vergleich der unterschiedlichen Fugenwahrnehmung bei verschiedenen Falzformen (nach [CAR 05]).

Basierend auf der Verzehnfachungsregel (vgl. Abbildung 1.2) beschäftigen sich daher auch viele Forschungsarbeiten mit der Methodenentwicklung für den Entwicklungszeitraum eines Produkts [BOH 98], [STO 10], [STA 94], [WITT 11], [LEU 10], um bereits ab Presswerk einer Nullfehlerproduktion entgegen zu streben. Je früher angefangen wird Fehler aufzudecken, zu beheben oder gar im Vorfeld zu vermeiden, desto günstiger ist es für das Unternehmen. Unter anderem stellt jedoch Heingärtner [HEI 10] heraus, dass mittlerweile vor allem im Umformprozess die Grenzen des Materials und der Werkzeuge erreicht sind und nur mit enormem Kostenaufwand - wenn überhaupt - die Ursachen für Prozessschwankungen identifiziert und behoben werden können. Hieraus resultierend ist es daher umso wichtiger durch Prozesskenntnis und/oder numerische Lösungen Mitarbeiter bei der fachgerechten Definition der Ziele (Festlegung der Toleranzbänder) zu unterstützen. Leuschel [LEU 10] merkt an, dass im Dialog zwischen Produktion und Entwicklung Werker und Lieferanten ihre Bauteil- und Prozessstreuungen tendenziell eher weiter auslegen um Nacharbeitsaufwand zu vermeiden und enge Toleranzen am Fertigfahrzeug nicht gewährleisten zu müssen.

2.2.1.1 Numerische Werkzeuge im Karosseriebau-Entwicklungsprozess

Auf Grund der immer kürzer werdenden Entwicklungszyklen erfährt die Anwendung von Simulationsmethoden gerade im Entwicklungsprozess einen starken Interessensgewinn [HEN 97]. Durch Nachbildung eines Systems ist es das Ziel zeit- und ressourcensparend an Erkenntnisse zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind (Richtlinie 3633) [VDI 13], [EBE 10]. Bevor eine Simulation jedoch produktiv eingesetzt werden kann müssen Vorbereitungen getroffen werden. Diese lassen sich nach [NET 02] gliedern in: Prozessanalyse, Prozessmodellierung und Validierung am Experiment. Sobald das Simulationsmodell anwendungsbezogen die benötigte Genauigkeit aufweist, kann das Modell zur Simulation von Experimenten verwendet werden.

Im Entwicklungs- und Absicherungsprozess vom Karosseriebau finden überwiegend zwei Simulationsmethoden Anwendung, die klassische Toleranzsimulation und die Finite-Elemente-Simulation [STO 10]. Ziel beider Simulationen ist die Vorhersage der zu erwartenden Maßabweichungen. Tabelle 2 stellt diese beiden Methoden mit ihren Eigenschaften gegenüber.

Tabelle 2: Vergleich der Eigenschaften der gängigen Simulationsmethoden, die in der Karosseriebauentwicklung Anwendung finden.

Eigenschaften	klassische Toleranzsimulation	Finite-Elemente-Simulation
Materialmodell	nicht vorhanden bzw. unendliche Steifigkeit	realitätsnah, elasto-plastisch, visko-plastisch, ...
Materialdicke	konstant	konstant bei Einsatz von 2D Vernetzung, sonst variabel mit entsprechender Modellkomplexität
Fügeoperationen	Eingabe von Verteilungsfunktionen an punktuellen Merkmalen	realitätsnah bei hohem Modellierungsaufwand
Rechenzeitaufwand	gering	hoch
Modellierungsflexibilität	gering	hoch
Ergebnis	Statistische Beitragsleisteranalyse, Verteilungsfunktion der vorher definierten Merkmalspunkte am Zusammenbau	Maßabweichung über den gesamten Zusammenbau auf Basis der Eingangsparameter

Klassische Toleranzsimulation in der Fügesimalung im Entwicklungsprozess

Die statistische Toleranzsimulation [STO 10], [WITT 11], [BOH 13], [PAW 11] basiert auf den mathematischen Grundlagen der Toleranzanalyse und -synthese, die hauptsächlich für eindimensionale Fälle genutzt werden. Durch Simulationsumgebungen¹⁹, die das Einbinden von CAD²⁰-Datensätzen ermöglichen, kann auch der dreidimensionale Fall abgebildet werden. Das Ziel dieser Systeme ist es statistische Beitragsleisteranalysen (bzw. Sensitivitätsanalyse) mittels Monte-Carlo-Algorithmen durchzuführen. Innerhalb der Sensitivitätsanalyse wird die beschränkte Anzahl von Parametern mit signifikantem Einfluss auf das jeweilige Merkmal aus den restlichen Parametern herausgefiltert [SIE 10]. Die Genauigkeit des Ergebnisses nimmt zu mit steigender Anzahl von Durchläufen [GLA 99]. Die Fügeoperationen werden dabei nach dem 3-2-1 Prinzip (vgl. Kapitel 2.1.2) abstrahiert. Mit den Referenzpunkten werden die Bauteile fest im Simulationsraum fixiert. Sowohl den Fixierpunkten als auch den definierten Merkmalspunkten lassen sich Verteilungsfunktionen für die Abbildung der Verformung in der Realität zuweisen. Durch die unendliche Steifigkeit der Bauteile wird so für jeden Iterationsschritt eine Näherungslösung der Fixierpunkte ermittelt. Durch diese Näherungslösung kann es vorkommen, dass Bauteile nach dem simulierten Fügeprozess gegenseitig Durchdringungen aufweisen. Je großflächiger die Bauteile sind, desto größer die Gefahr, dass dieses Phänomen durch Hebeleff-

¹⁹ z.B. 3DCS mit Einbindung in Catia von Dassault Systèmes

²⁰ Computer-Aided Design

fekte auftritt. Um dem entgegenzuwirken bieten Anbieter von Toleranzsimulationssoftware auch die Möglichkeit zur Integration von elastischen Effekten²¹ mittel Steifigkeitsmatrizen. Wechselwirkungen zwischen den aufgebrachtten Kräften der Schweißzangen, der Spannelemente und die daraus resultierenden Rücksprungkräfte mit der realistischen Steifigkeit der Bauteile können so realitätsnäher abgebildet werden. Phänomene, wie eine geringere Maßabweichungen am Zusammenbau als an den dazugehörigen Einzelteilen lässt sich so nachbilden [STO 10], [LIU 98]. Entscheidender Vorteil von Toleranzsimulationen ist die schnelle Rechenzeit, sowie die statistischen Aussagen über den gesamten Lebenszyklus der Anlage. Die Nachteile betreffen die Einbußen in der Genauigkeit und Flexibilität.

FE-Simulation in der Fügésimulation im Entwicklungsprozess

Eine deutlich längere Rechenzeit weist dagegen generell die wohl bekannteste Methode zur numerischen Abbildung von elastischen Eigenschaften auf: die Finite Elemente Methode (FEM). Sie stellt „ein numerisches Näherungsverfahren zur Lösung von Differentialgleichungssystemen, die physikalische Problemstellungen beschreiben“ dar [TRO 11]. Sie kann lineare, aber auch nichtlineare Probleme beschreiben. Trotz der höheren Genauigkeit der Simulationsergebnisse und des erkannten Forschungsbedarfs bei der klassischen Toleranzsimulation ist die letztere immer noch die weitverbreitetste Simulationemethode in der industriellen Toleranzabsicherung [UNG 09]. Der Aufwand der Simulationsmodellerstellung sowie der Rechenaufwand bei der FE-Simulation sind abhängig von der Komplexität des abzubildenden Prozesses und damit oft sehr hoch. Die Genauigkeit hängt maßgeblich von der Steifigkeitsmatrix und der Netzgenauigkeit ab. So ist es für die FE-Simulation wichtig, anwendungsbezogen die notwendige aber auch maximal benötigte Netzgenauigkeit zu erarbeiten. Die Berechnungszeit wächst mit der Netzgröße als auch mit der Anzahl der Simulationsdurchläufe. Stockinger [STO 10] und Liu [LIU 95] fassen wichtige Grundsätze für die toleranzgerechte FEM Simulation, wie z.B. für das Abbilden der Streuung von Eingangsparametern, zusammen. Um die Rechenzeit von großen FE-Simulationsmodellen zu minimieren werden immer häufiger Metamodelle²² abgeleitet. Dazu werden mittels eines statistischen Versuchsplans²³ definierte Parametervariationen berechnet [SIE 10] und, angelehnt an die Beitragsleistanalyse, die fürs Simulationsergebnis relevanten Parameter ermittelt. Das FE-Modell wird anschließend durch eine Approximationsfunktion, das sogenannte Metamodell, basierend auf den relevanten Parametern ersetzt. Mit dem neu erzeugten Modell lassen sich auch bisher nicht untersuchte Parameterkombinationen mit geringerem Simulationszeitaufwand berechnen. Darüber hinaus sind Metamodelle oft Ausgangspunkt für Optimierungsfragestellungen.

²¹ Eine dieser Anwendungen heißt z.B. Compliant Modeler (3DCS). Der Compliant Modeler dient zur numerischen Toleranzsimulation unter Berücksichtigung der elastischen Effekte der Bauteile

²² Ein Metamodell ist ein Ersatzmodell bestehend aus Approximationsfunktionen des realen Systems bzw. des originalen Simulationsmodells.

²³ Die statistische Versuchsplanung ist ein Werkzeug der „Design of Experiments“-Methode (vgl. Kapitel 3.5).

Insgesamt unterscheidet man zwischen einer Mehrzieloptimierung²⁴ [BLU 04]/[DUE 79] und einer multidisziplinären Optimierung²⁵ [DUD 05]/[WIL 04]. Schumacher [SCHU 13] veranschaulicht die verschiedenen dahinter stehenden Optimierungsverfahren, wie z.B. Optimierung mit und ohne Restriktionen, sowie stochastische Suchstrategien wie den Evolutionsalgorithmus.

2.2.2 Produktionsseitige Optimierung der Qualität

Neben der entwicklungsseitigen Weichenstellung zur Erzielung der geforderten Qualitätsziele spielen auch die produktionsseitigen Qualitätstechniken eine entscheidende Rolle. Die Prozessqualität im Karosseriebau lässt sich zusammenfassend durch drei grundlegende Ansätze verbessern:

- Verringerung der Bauteilabweichungen im Presswerk
- Erhöhung der Prozesssicherheit der Fügetechnologien
- Erhöhung der Robustheit der Fertigungsanlage (durch Regelsysteme)

Im Rahmen der produktionsseitigen Verbesserung der Einzelteilmaßhaltigkeit ist die Forschungsarbeit von Neumann [NEU 13] zu nennen. Neumann entwickelte einen präventiven Regelkreis für Umformprozesse zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk. Um auf Grundlage der Materialeigenschaften Stellgrößenveränderungen im Umformprozess durchzuführen, findet in [NEU 13] und [HEI 10] ein Wirbelstrommessverfahren Anwendung, das in kürzester Zeit die Materialkennwerte des Coils während des Schneidens der Platinen ermittelt. Neumann weist nach, dass trotz sprunghafter Kennwertänderung ein gleichbleibendes Maßhaltigkeitsergebnis durch sprunghaftes Nachregeln erzeugt werden kann. Sie stellt jedoch Schwierigkeiten in der simulativen Absicherung, dem Monitoring des Prozesses und der Regelung beim Einsatz heraus. Es gibt bislang kein ausreichendes Modell zur Abbildung des realen hochkomplexen Umformprozesses (Zusammenspiel aus Reibbedingungen, Blechhalterkräften, Materialeigenschaften, Anlagentemperatur, ...) um Maßhaltigkeiten von realen Aufträgen vorhersagen zu können.

Zur Optimierung der Fügetechnologien stellt Meyer [MEY 12] eine Methode zur Ermittlung von Verfahrensgrenzen von Fügetechnologien zur Verfügung. Fehleingesetzte Technologien lassen sich damit identifizieren sowie bei Bedarf dem Anwendungsfall angepasste Technologien aufzeigen.

Angelehnt an die Top-down- und Bottom-up-Modellierung [SCHM 07] für komplexe Systeme lassen sich in der Produktionstechnik vorliegende Regelansätze zur Robustheitssteigerung auch in zwei Kategorien einteilen: Bottom-Up (Sicht auf die Prozesskette: vom Einzelteil zum Zusammenbau – aufsteigende Informationsverarbeitung) und Top-Down

²⁴ Mehrzieloptimierung beschreibt die Optimierung nach verschiedenen Kriterien, die voneinander abhängig sind, dies erzeugt immer eine Paretofront.

²⁵ Multidisziplinäre Optimierung beschreibt die Optimierung verschiedener Faktoren unterschiedlicher Fachgebiete.

(Sicht auf die Prozesskette: vom Zusammenbau zum Einzelteil). Die beiden Methoden unterscheiden sich neben der grundlegenden Denkrichtung darin, dass die Bottom-Up-Methoden ein Agieren erfordern, wobei die Top-Down-Methoden eher vom Reagieren geprägt sind, da zunächst, um aufs vorliegende Beispiel zurückzukommen, der Zusammenbau hergestellt werden muss bevor er in seine Einzelteile analytisch „zerlegt“ werden kann. Nicht ohne Grund teilt Bente et al [BEN 02] die beiden Ansätze in theoriegeleitet (Top-Down) und datengetrieben (Bottom-Up) ein. Trotz der Vorteile der Bottom-Up-Methode sind die Top-Down Ansätze aktuell verbreiteter. Hier ist vor allem die statistische Prozesskontrolle (SPC-Steuerung - „statistical process control“) mit der damit einhergehenden Verwendung von Qualitätsregelkarten zu nennen (vgl. Kapitel 3.2) [VDA 4]. Bei der Auswertung geht es darum, typische Verläufe in den Messreihen der Zusammenbauten zu erkennen und entsprechend manuell durch Justage im Prozess zu reagieren. Abbildung 2.13 zeigt beispielhaft typische Messreihenverläufe.

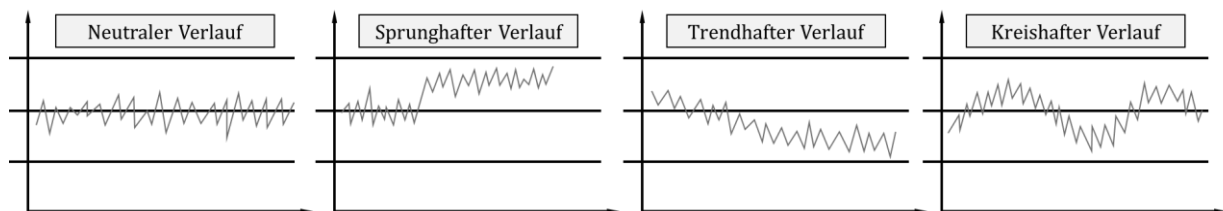


Abbildung 2.13: Schematische Darstellung von typischen Messreihenverläufen; in realen Messreihenverläufen liegen diese Muster überwiegend gegenseitig überlagert vor.

In realen Messreihen überlagern sich die verschiedenen Verläufe oftmals, was die manuelle Mustererkennung erschwert. Nicht zuletzt deswegen entwickelt sich neben der manuellen Auswertung der Trend, Messreihen automatisiert auszuwerten. Hierfür existieren bereits eine Vielzahl von Forschungsarbeiten zur Mustererkennung mittels neuronaler Netze [JAN 03], [PAC 07], [GUH 10], [PSA 11]. Verbreitet sind dabei Forschungsarbeiten, die sich entweder mit dem Mittelwert oder der Streuung unter Annahme, dass der jeweilige andere Kennwert konstant ist, beschäftigen. Guh [GUH 10] entwickelt eine Methodik um gleichzeitig definierte Messreihenverläufe in Qualitätsregelkarten für Mittelwert und Streuung zu identifizieren. Dies verkürzt die Reaktionszeit und ersetzt nach der Implementierung notwendige Prozesskenntnisse des Werkers. Dennoch ist auch dieser Ansatz noch kein Allheilmittel. Das neuronale Netz ist auf die Erkennung der erlernten Muster beschränkt. Darüber hinaus bleibt der zeitliche Versatz zwischen Auftreten der Prozessunsicherheit, der Erkennung dessen und des erstmaligen Wirksamwerdens der Änderung des Prozesses bestehen (vgl. Abbildung 2.9). Fritzsche et al [FRI 17] weisen darauf hin, dass hierfür selbst bei sofortigem Handeln der zeitliche Umfang oftmals länger als eine Stunde beträgt. Auch wenn diese Zeitspanne durch den Einsatz von Online-Erkennung reduziert werden kann, wobei auch dann die Entscheidung zum Eingriff und dessen Zeitpunkt immer noch vom jeweiligen Werker abhängt, wird entsprechend wichtige Pro-

duktionszeit verschwendet. Sofern die in diesem Zeitraum produzierten Zusammenbauten nicht als Ausschuss deklariert werden, was zwangsläufig Kosten verursacht, reduziert sich die Maßhaltigkeit der Flotte²⁶.

Aber auch die Bottom-Up Ansätze finden durch steigende Digitalisierung immer mehr Anklang. Hierbei geht es darum, nicht die Eingangsparameter bzw. Randbedingungen eines Prozesses über die entstehende Produktqualität entscheiden zu lassen, sondern durch ausreichendes Messen der Einflussparameter bereits im Vorfeld den Prozess gezielt daraufhin anzupassen um die Produktqualität zu steigern (u. a. [LIE 05], [NEU 13], [HEI 10], [GER 14], [KEL 16], [FRI 17]).

Liedl [LIE 05] entwickelt in seiner Arbeit eine Methode für ein automatisiertes Prozessmonitoring für Spritzgießprozesse auf Basis von neuronalen Netzen. Auf Grund der nur nicht-zerstörungsfreien Prüfung der Produkte ist es sein Ziel auch ohne 100%-Kontrolle eine Aussage über die Qualität der gefertigten Produkte zu liefern. Mit einer breiten Datenbasis der möglichen Prozesseinstellungen trainiert er zunächst das neuronale Netz. Darauf aufbauend ist es ihm möglich mit dem Netz eine Arbeitspunktoptimierung durchzuführen, sodass durch Einstellung der Parameter (z.B. Temperatur, Druck, ...) an der Anlage die gewünschte Qualität gefertigt wird. Durch Online-Anpassung des neuronalen Netzes wird der Prozess auch robust gegen Umwelt- und Störeinflüsse steuerbar.

Germer et al [GER 14] haben sich mit der Online-Prozessoptimierung im Karosseriebau beschäftigt. In einem Pilotprojekt sammelten sie tageweise die Messdaten der Karosserien, werteten diese aus und gaben für den folgenden Tag Montageempfehlungen. Sie beschränkten sich auf die Montage der Rückwandtür mit Fokus der Fugenlage an der Heckleuchte. Zur simultativen Darstellung nutzten sie die numerische Toleranzsimulation. Auf Grund der sehr komplexen geometrischen Zusammenhänge bei der Montage von Anbauteilen versuchte die Arbeitsgruppe die Unzulänglichkeiten der Software durch Aneinanderreihung von Fügeoperationen bestmöglich für ihren Anwendungsfall zu nutzen. Durch die daraus entstehende Komplexität des Modells weisen sie auf die daraus resultierenden Probleme der Modellanpassung nach Veränderung der Montagekriterien hin.

Obwohl der Entwicklungsprozess immer stärkere Digitalisierung erfährt [WAT 12], weisen auch die Arbeitsgruppe Fritzsche et al [FRI 12] (Fügetechnik im Karosseriebau) und Neumann [NEU 13] (Umformtechnik im Presswerk) auf den noch nicht ausgereiften Stand der Technik in der simulativen Darstellung der Übertragungsfunktionen hin. Die Durchführung von Justagevorgängen, wie auch die Veränderung der Parameter durch äußere Einflüsse benötigen kontinuierliche Modellanpassungen, was bisher ein serienbegleitendes Prozessmonitoring in der Umsetzung erschwert. Die Arbeitsgruppe Fritzsche et al [FRI 11] gibt für einen kurzen Regelkreis einen ersten Lösungsansatz. Sie haben eine automatisierte Lösung für eine Justage der Spannelemente auf Hydraulikbasis entwickelt.

²⁶ Flotte meint in der Automobilindustrie die Gesamtheit der von einem Unternehmen produzierten Fahrzeuge.

Sie schreiben, dass ihr Spannsystem in der Lage sein kann, selbstregelnd und den Anlageningenieur unterstützend, die Justagevorgänge vorzunehmen. Die Idee ist mit Hilfe langjähriger Anlagenführer und dokumentierter Einstell- und Justagedaten einen sogenannten „Shimsassistenten“ zu entwickeln. Weiterhin besteht in ihrem Konzept die Möglichkeit das System so auszustatten, dass es mit Hilfe der hydraulischen Drucksensoren an den Kinematikmodulen Belastungsänderungen wahrnehmen kann. Diese Belastungsänderungen werden durch Maßhaltigkeitsänderungen am Einzelteil hervorgerufen. Dadurch ist das System in der Lage dem Anlagenführer Rückschlüsse auf die Bauteilqualität zu liefern. Hierbei besteht der Forschungsschwerpunkt jedoch auf der technischen Realisierbarkeit der Hydrauliksysteme und nicht auf der realen Integration in einen Regelkreis.

In [FRI 17] haben sich Fritzsche et al erste Gedanken zur Nutzung eines neuronalen Netzes zur Berechnung von Justageempfehlungen im Karosseriebau unter Nutzung ihrer entwickelten extern ansteuerbaren Spannvorrichtungen [FRI 12] gemacht. Hierbei geht es darum, die oftmals mehrere Monate lange Erprobungsphase der Fertigungsanlage, die unter anderem zum Wissensgewinn der Werker genutzt wird, durch die künstlich aufgebaute Datenbasis in einem neuronalen Netz zu verkürzen. Auch mehr Entscheidungssicherheit soll so in den Prozess etabliert werden, da durch den sehr individuell aufgebauten Erfahrungsschatz des jeweiligen Werkers selbst bei gleichem Messprotokoll unterschiedliche Justagevorgänge empfohlen werden. In ihrer Arbeit geht es aber vor allem darum die in aktueller Literatur empfohlenen Netzwerkparameter anhand eines rechteckigen Versuchsaufbaus mit 11 Spannelementen angelehnt an eine Spannvorrichtung im Karosseriebau zu variieren und zu überprüfen. Als Ausblick stellen sie die Integration eines neuronalen Netzwerks in eine reale Karosseriebauumgebung als notwendige Entwicklung vor.

Keller et al [KEL 16] bauen auf dem in [FRI 11] angesprochenem Lösungsansatz der Hydraulikdrucksensoren zur Ermittlung von geometrischen Abweichungen im Fügeprozess auf. Das theoretische Modell zur Berechnung der entsprechenden Justageempfehlungen auf Basis der ermittelten Kräfte wird in [KEL 14] entwickelt. Keller et al [KEL 16] weisen auch die höchste Komplexität des Karosseriebaus, deren Anlagen und der stark individuellen geometrischen Abweichungen von Bauteilen aus einem Serienprozess hin, sodass die ersten experimentellen Reihen auf einem Biegebalken und später einem rechteckigen Blech basieren. Die selbst eingebrachten geometrischen Abweichungen der Testbauteile werden mittels Drucksensoren in der Spannvorrichtung aufgenommen. Es werden exemplarische Fügeprozesse sowohl mit als auch ohne Justage durchgeführt. Überwiegend konnten die Fügeprozesse mit Justage im Vergleich zu Prozessen ohne Justage zu einer Verbesserung der geometrischen Abweichungen führen.

Neben diesen größer angelegten Regelkreisansätzen gibt es das Bottom-Up Prinzip aber auch in kleinerem Umfang bereits im Einsatz. Das Best-Fit-Verfahren [BOH 13] zur An-

bringung von Türen und Klappen an der Karosserie kann das Fugenergebnis noch während der Montage optimieren. Im Gegensatz zur starren Ausrichtung nach vorher definierten Punkten nach dem 3-2-1 Prinzip werden beim Best-Fit-Verfahren die Fugen optimal den vorliegenden Toleranzen beider Fügepartner entsprechend eingestellt. Dafür werden zuvor beide Fügepartner vermessen, das erreichbare Fugenoptimum berechnet und dementsprechend gefügt.

2.2.3 Fazit zum Forschungsstand

Wie in Kapitel 2.2.2 erläutert gibt es verschiedene Forschungsarbeiten zu serienbegleitendem Prozessmonitoring [LIE 05], [NEU 13], [GER 14]. Vor allem in Arbeiten, die den Karosseriebau betreffen, wird immer wieder auf die Komplexität und die damit einhergehende mangelnde simulative Abbildbarkeit hingewiesen, wobei hier häufig die Toleranz-[GER 14] und FE-Simulationen [NEU 13] eingesetzt werden. In anderen Branchen wie beim Spritzgießen hat sich das neuronale Netz als Vorhersagewerkzeug zur objektivierten Prozessregelung als geeignet erwiesen [LIE 05]. Das Wissen von langjährigen Mitarbeitern ist bei der Entwicklung von Methoden und Modellen wertvoll [JUN 97], zu nutzen und geeignet zu bündeln. Durch eine verbesserte Informationsbasis innerhalb eines Prozessmonitorings kann Wissen so für mehr Mitarbeiter zugänglich gemacht werden, wodurch die Qualität der Entscheidungen beträchtlich positiv beeinflusst werden kann [RHE 13]. Produktionsbegleitende Eingriffe zum Zwecke der Forschung können mit erheblichem Aufwand verbunden sein: Fritzsche et al [FRI 17] und Keller [KEL 16] vermeiden dies und demonstrieren mit einem Laborversuchsstand ihre digital geregelte Justage einer geometriefestlegenden Station. In der wissenschaftlichen Literatur sind Produktionsanlagen von Heckdeckeln bzw. Rückwandtüren noch wenig betrachtet. Hier sind als Forschungsarbeiten z.B. [GER 14], [TIE 09] und [UNG 09] zu nennen, wobei sich nur Germer et al auf Fertigungsprozesssteuerungen beziehen. Tiedt und Ungemach beschäftigen sich jeweils mit FE-Simulationen zum Abbilden von Maßhaltigkeitseinflüssen auf Basis der Gasfederkräfte am Fertigfahrzeug.

Thematisch unbehandelt in der Forschung ist die chargenweise Robustheitssteigerung von Fertigungsanlagen im Karosseriebau in Verbindung mit neuronalen Netzen. Entsprechend ist das Ziel der vorliegenden Arbeit, mittels eines Bottom-Up Ansatzes ein durch neuronale Netze unterstütztes Prozessmonitoring aufzubauen. Dieses soll in bestehende Anlagen und Abläufe ohne größere Investitionen integriert werden und liefert chargenweise digital objektivierte Justageempfehlungen während des laufenden Produktionsprozesses, was im Idealfall zu einer Qualitätssteigerung führt.

3. Mathematik und Statistik

3.1 Künstliche neuronale Netze zur Objektivierung der Prozesskontrolle

Künstliche neuronale Netze²⁷ sind den biologischen neuronalen Netzen z.B. im Gehirn eines Menschen nachempfunden [KRI 07]. Ein neuronales Netz (Abbildung 3.1) besteht aus mehreren Neuronen, die untereinander mit Links bzw. Kanten verbunden sind. Mehrere Neuronen werden zu Schichten gruppiert, wobei es immer genau eine Ein- und eine Ausgabeschicht bzw. -vektor und eine variabel wählbare Anzahl von verdeckten Schichten (engl. hidden layers) gibt [REY 11].

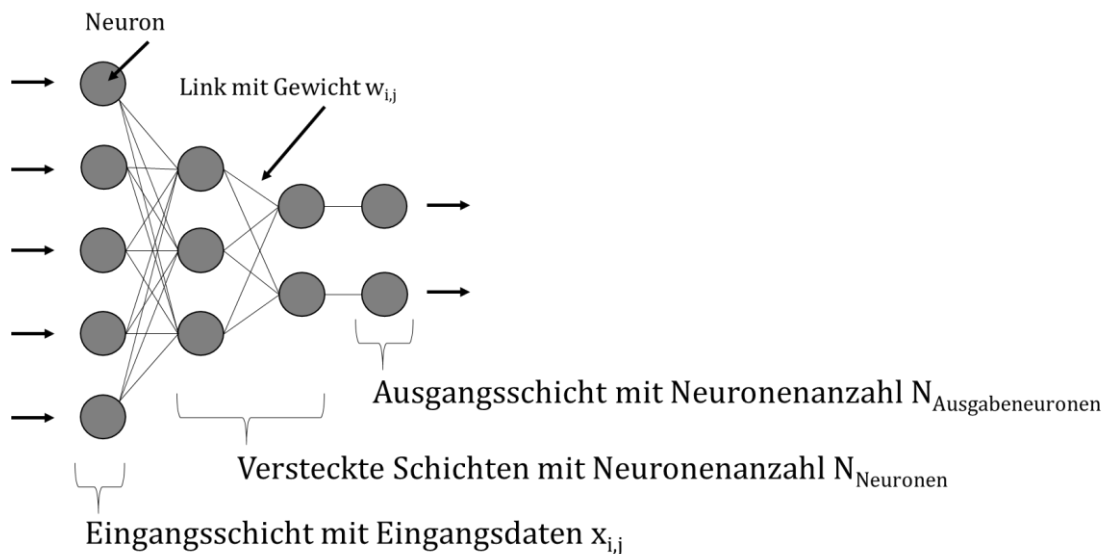


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung eines künstlichen neuronalen Netzes; hier exemplarisch ein Multi-Layer-Perceptron [KRI 07] mit Feed-Forward Architektur und zwei verdeckten Schichten.

Grundsätzlich kann die Aufgabe eines neuronalen Netzes darin bestehen, eine geeignete Abbildung zwischen Ein- und Ausgabevektor zu repräsentieren. Die Anzahl der verdeckten Schichten sollte dabei an die gegebene Anwendung angepasst sein, da mit steigender Anzahl der verdeckten Schichten die Komplexität einer möglichen Abbildung ansteigt [KRI 07]:

- Neuronales Netz mit 0 verdeckten Schichten → Lineare Abbildung
- Neuronales Netz mit 1 verdeckten Schichten → Konvexes Polygon in 2D Ebene

²⁷ Im Folgenden ist mit neuronalem Netz immer das künstliche neuronale Netz gemeint, im Sinne der Übersichtlichkeit wird jedoch auf das Adjektiv künstlich verzichtet

- Neuronales Netz mit 2 verdeckten Schichten → jede beliebige nicht lineare Abbildung, falls abhängig von der Anzahl der Ein- und Ausgabeneuronen genügend Neuronen in der verdeckten Schicht vorliegen

Darüber hinaus kann die Anordnung der Schichten bzw. die Anzahl der Links sehr unterschiedlich ausfallen (Topologie des Netzes) [KRI 07]:

- FeedForward-Netze: mit untereinander klar abgetrennten Neuronenschichten. Abbildung 3.1 zeigt diese Topologie beispielhaft. Die Links gehen immer nur zu Neuronen der nächsten Schicht (in Richtung Ausgabeschicht). Diese Art der Ausprägung des neuronalen Netzes mit mindestens einer verdeckten Schicht nennt sich auch Multi-Layer-Perceptron (sonst Single-Layer-Perceptron).
- Rückgekoppelte Netze: ein Neuron kann sich selbst oder durch einen sich ergebenden Link selbst beeinflussen. Es wird zwischen direkter, indirekter und lateraler Rückkopplung unterschieden.
- Vollständig verbundene Netze: die Schichten sind voneinander trennbar, Links jeglicher Art sind denkbar. Direkte Rückkopplungen kommen jedoch eher selten vor, da jedes Neuron auch ein Eingabeneuron sein kann.

Die einzelnen Links werden durch ihre Gewichte w_{ij} in der Gewichtsmatrix \bar{w} definiert, hierin ist das „Wissen“ (Kenntnis über die Wirkzusammenhänge zwischen Eingang- und Ausgangsdaten) des neuronalen Netz gespeichert. Das Besondere am neuronalen Netz ist, dass es im Gegensatz zu herkömmlichen starren Algorithmen durch Generalisierung und Assoziation die Fähigkeit erlangt auch für nicht explizit trainierte Probleme Lösungen zu finden [REY 11]. Der Link zwischen zwei Neuronen i und j lässt sich nach Aktivierung der Ausgabe a_j des sendenden Neurons j wie folgt beschreiben:

$$input_{ij} = a_j w_{ij} \tag{1}$$

Dabei gilt:

$input_{ij}$ Eingabewert, den ein Neuron i von einem anderen Neuron j erhält

i Index des empfangenden Neurons

j Index des sendenden Neurons

a_j Ausgabe des sendenden Neurons

w_{ij} Gewicht zwischen empfangenden Neuron i und sendenden Neuron j

In den meisten Anwendungsfällen wird zur Aktivierung sämtlicher Neuronen eines Netzes die sigmoide Aktivitätsfunktion verwendet [MAC 02]:

$$f_{Akt}(x) := \frac{1}{1+e^{-x}} \tag{2}$$

wobei x in diesem Falle die Summe der Inputs der Neuronen der vorherigen Schicht ist, also

$$x = input_i = \sum_j input_{ij} \quad (3)$$

Die Aktivitätsfunktion berechnet dann wiederum die Ausgabe a_j des Neurons j . Typischerweise werden die Gewichte zum Start, also vor einer Trainingsphase, mit geeigneten Zufallswerten initialisiert [AMA 13], beispielsweise aus dem Intervall $[-1; +1]$.

Wie das neuronale Netz anschließend die eingegebenen Trainingsdaten verarbeitet hängt wesentlich von der verwendeten Lernmethodik und dem Lernalgorithmus ab. Die Lernmethoden unterscheiden sich in:

- Unüberwachtes Lernen
- Überwachtes Lernen
- Verstärktes Lernen

Für Fittingprobleme, wie in der folgenden Arbeit vorliegend, eignet sich das zielgerichtete, überwachte Lernen [KRI 07]. Überwachte Lernalgorithmen basieren auf Optimierungsverfahren, gängig ist hier das Gradientenverfahren. Die Trainingsdaten müssen sowohl Eingabedaten x_{ij} als auch die dazugehörige Ausgabedaten y_{ij} beinhalten. Eine notwendige, minimale Größe des Trainingsdatensatzes, um entsprechende Muster in den Daten erkennen zu können, kann nicht generell angegeben werden – sie steigt aber mit der Komplexität der zu findenden Muster an. Grundsätzlich ist eine größere Datengrundlage meist ein Vorteil. Es ist üblich den vorhandenen Trainingsdatensatz für eine Trainings- und eine Testphase aufzuteilen. Gängige Teilungsverhältnisse sind 60/40 oder 70/30. Wichtig dabei ist es, dass der Inhalt des Trainingsdatensatzes gleichmäßig auf Test- und Trainingsphase aufgeteilt wird, damit das Netz einen breit gefächerten Datensatz sowohl in der Test- als auch in der Trainingsphase zur Verfügung gestellt bekommt. Das beste Trainingsergebnis kann ein neuronales Netz erzeugen, wenn z.B. bei Nutzung eines DoE-Versuchsplans jede Klasse (jede Datenkategorie) gleichmäßig in den Datensätzen vertreten ist, sowie in gleichmäßiger Anzahl über Datensätze verfügt [MAZ 08]. Darüber hinaus sind Datensätze mit Fehlstellen aus dem Trainingsdatensatz zu löschen, um so das bestmögliche Lernverhalten des Netzes zu gewährleisten [GAN 11].

Ziel des Lernens oder des Trainings ist es aber in jedem Fall, die Gewichte der Gewichtsmatrix so zu modifizieren, dass in den Daten vorhandene Verbindungen zwischen Ein- und Ausgabe durch eine Abbildungen repräsentiert werden. Dabei ist es das Ziel des Lernalgorithmus nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate [OPF 08] den Netzwerkfehler E_{SSE} [SCHM 14] zu minimieren (Gleichung 4). Dabei ist die Einheit des angegebenen Fehlers anwendungsabhängig: Im vorliegenden Fall beziehen sich die Ausgangsvektoren

auf geometrische Maßabweichungen, angegeben in mm. Entsprechend ist die Einheit der Fehlerfunktion E_{SSE} Quadratmillimeter.

$$\min_{\bar{w}} \|E_{SSE}\| \quad (4)$$

mit

$$E_{SSE} := \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_{\text{Versuche}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{Ausgabeneuronen}}} (o_{i,j} - y_{i,j})^2 \quad (5)$$

$$o_{i,j} := f(x_{i,j}, \bar{w}) \quad (6)$$

mit

N_{Versuche}	Größe des Datensatzes
$N_{\text{Ausgabeneuronen}}$	Anzahl der Neuronen der Ausgabeschicht
$x_{i,j}$	Eingangsvektor
$y_{i,j}$	wahrer/gemessener/korrektter Ausgangsvektor
$o_{i,j}$	propagierter Ausgangsvektor

Der minimal erreichbare Netzwerkfehler E_{SSE} wiederum hängt maßgeblich vom angewandten Lernalgorithmus ab, hier sind beim überwachten Lernen vornehmlich zu nennen [REY 11], [KRI 07]:

- Hebb-Regel (nicht für komplexe Abbildungen)

$$\Delta w_{ij} = \varepsilon a_i a_j \quad (7)$$

- Delta-Regel (nur für lineare Abbildungen)

$$\Delta w_{ij} = \varepsilon \delta_i a_j \quad (8)$$

mit $\delta_i = a_i$ (wahrer Wert) - a_i (propagierter Wert)

- Error-Backpropagation (Erweiterung Delta-Regel für nichtlineare Abbildungen)

$$\Delta w_{ij} = \varepsilon \delta_i a_j \quad (9)$$

mit

$$\delta_i = \begin{cases} f'_{Akt}(\text{netzinput}_i) * (a_i(\text{wahrer Wert}) - a_i(\text{propagierter Wert})), & \text{falls } i \text{ ein Neuron der Ausgangs-Schicht ist} \\ f'(\text{netzinput}_i) * \sum_L (\delta_i * w_i), & \text{falls } i \text{ ein Neuron einer versteckten Schicht ist} \end{cases}$$

mit

Δw_{ij} Veränderung des Gewichts zwischen Neuron i und j

- ε vorher festgelegter Lernparameter (ggf. auch variabel vgl. Resilient Backpropagation [RIE 93]), oft im Intervall $[0,01;0,9]$, hängt maßgeblich von der Fragestellung, dem Netz und den Trainingsdaten ab [KRI 07]
- δ_i Delta-Wert des Neurons i (siehe jeweilige Berechnungsvorschrift)
- a_i Ausgabe des empfangenden Neuron
- a_j Ausgabe des sendenden Neuron
- f'_{Akt} erste Ableitung der Aktivitätsfunktion

Darüber hinaus wurde der Error-Backpropagation-Algorithmus von Riedmiller und Braun [RIE 93] weiterentwickelt. Die Resilient Backpropagation (Rprop) zeichnet sich dadurch aus, dass sie zeitlich veränderliche Lernparameter ε_t beim Gradientenabstiegsverfahren verwendet [RIE 93].

Neben dem Lernalgorithmus hängt der Netzwerkfehler E_{SSE} aber auch von der eingesetzten Neuronenzahl $M_{Neuronen}$ der verdeckten Schichten ab. Generell gilt in der Trainingsphase eines Netzes, dass durch steigende Neuronenzahl $M_{Neuronen}$, bei voller Austrainierung des Netzes gemäß den Daten, der Netzwerkfehler sinkt (Abbildung 3.2), da das Netz ab einem bestimmten Grad die Daten immer auswendig lernt, was jedoch nicht erwünscht ist.

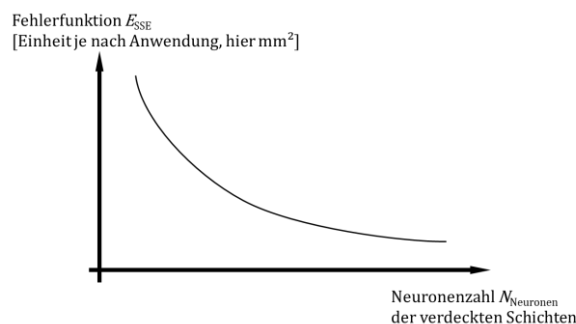


Abbildung 3.2: Trainingsphase: Zusammenhang zwischen dem Netzwerkfehler E_{SSE} (bezogen auf die Trainingsdaten) und der Neuronenzahl $M_{Neuronen}$ der verdeckten Schichten.

In der Testphase hingegen sinkt im optimalen Fall der Netzwerkfehler E_{SSE} zunächst (Finden von Mustern), bis er ein Minimum erreicht und dann wieder ansteigt (Abbildung 3.3, links). An diesem Zeitpunkt beginnt das Auswendiglernen. Das Minimum der Kurve beschreibt die zu wählende Neuronenzahl $M_{Neuronen}$ für die verdeckte Schicht. Ist jedoch kein Muster in den Trainingsdaten zu finden gewesen, steigt der Fehler in der Testphase bei steigender Neuronenzahl $M_{Neuronen}$ kontinuierlich an (Abbildung 3.3, rechts). Dies kann bedeuten, dass entweder das Netz einfach nur auswendig gelernt hat, da es kein Muster

gibt oder die Datenmenge zu klein gewählt ist und nicht ausreicht um ein Muster zu erkennen, da dieses ggf. auch noch von Störungen überlagert ist [BAS 00], [AMA 13].

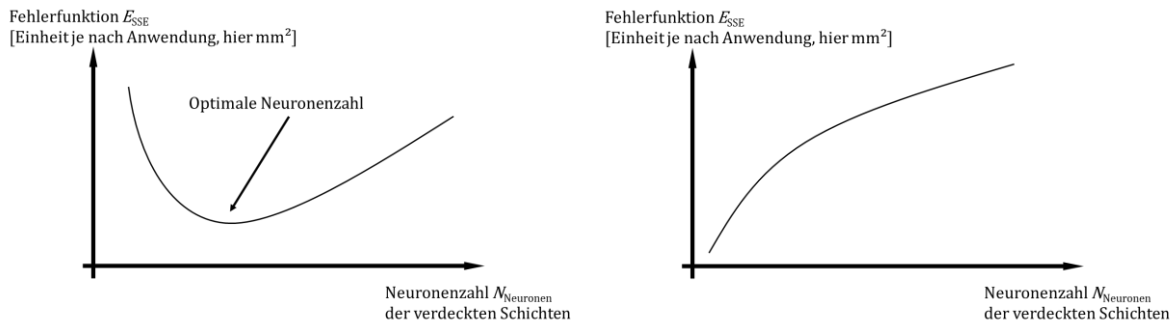


Abbildung 3.3: Testphase: Zusammenhang zwischen dem Netzwerkfehler E_{SSE} (bezogen auf die Testdaten) und der Neuronenzahl N_{Neuronen} der verdeckten Schichten; links: optimaler Fall; rechts: kein Muster erkannt

Zur Festlegung der optimalen Neuronenzahl N_{Neuronen} der verdeckten Schicht finden sich in der Literatur verschiedene Algorithmen: z.B. Dynamic Node Creation, Cascade Correlation und deren verwandter Brain Construction Algorithmus (BCA) [STA 03]. Der BCA zeichnet sich durch seine Einfachheit in der Anwendung aus und hat dadurch eine hohe Akzeptanz. Bei diesem wird, wie zuvor beschrieben, die Neuronenzahl in den verdeckten Schichten kontinuierlich erhöht und das Netz bei jeder Veränderung grundlegend auf die Trainingsdaten neu trainiert. Das optimale Netz ist gefunden mit einer geeigneten Anzahl an Neuronen in den verdeckten Schichten sobald der Netzwerkfehler E_{SSE} bezogen auf die Testdaten ein Minimum findet (vgl. Abbildung 3.3 links). Unter Verwendung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate wird hierbei automatisch das globale Minimum gefunden, da die Fehlerkurve im 2-dimensionalen Raum eine Parabel, bzw. im $n-1$ dimensionalen Raum ein Paraboloid ist [REY 11].

3.2 Statistische Prozesssteuerung

Eine weitverbreitete Qualitätstechnik, die die Statistik nutzt, ist die statistische Prozesssteuerung („statistical process control“, kurz: SPC) [VDA 4]. Die Anwendung von Qualitätsregelkarten (Kapitel 2.1.2) spielt hier eine große Rolle, aber auch die Ermittlung von Prozesskennzahlen um die Robustheit²⁸ des Prozesses zu erörtern, um damit eine Einschätzung des aktuellen IST-Zustandes des Prozesses zu erhalten [DIE 14]. Die nach [VDA 4] definierten Prozesskennzahlen sind nur auf normalverteilte Prozesse anwendbar, was im Allgemeinen bei Fertigungsprozessen jedoch anzunehmen ist [BOH 13]. Grundsätzlich lassen sich die Einflüsse auf den Prozess in zufällige und systematische Einflüsse aufteilen, die sowohl sporadisch als auch kontinuierlich auftreten können. Die zufälligen Einflüsse bedingen die Abweichung des Merkmals vom Prozessmittelwert (Streuung um den

²⁸ Robustheit beschreibt in diesem Zusammenhang, die Verteilung des Merkmals in Bezug zu seinen Toleranzgrenzen, sowie laut VDA die Unempfindlichkeit des Prozesses gegen nicht exakt kontrollierbare Eingangsgrößen

Mittelwert μ , im Fall der Normalverteilung die Standardabweichung σ). Die systematischen Einflüsse, aufteilbar in vorhersagbare systematische Einflüsse und Störeinflüsse, erzeugen eine zusätzliche Abweichung des Prozesses (Verschiebung von Mittelwert μ zum Mittenwert²⁹). Systematische Einflüsse sollten unter allen Umständen eliminiert werden oder durch Prozessanalysen eindeutig bekannt sein, um sie entsprechend in die Korrektur einbeziehen zu können. Nach Anlauf eines neuen Prozesses ist es das höchste Gut den Prozess zu beherrschen. Das bedeutet, dass das Zeitverhalten und die Verteilungsform sich nicht mehr ändern bzw. nur in bekannter Weise oder nur in bekannten Grenzen. Durch Entnahme einer Stichprobe aus dem jeweiligen Fertigungsprozess, welcher bereits beherrscht ist, lässt sich für einen Prozess zielgerichtet die Langzeitfähigkeit mit folgenden Kennzahlen³⁰ beschreiben [VDA 4]:

Prozesspotenzial [DIE 14] bzw. Qualitätsfähigkeitskennzahl [VDA 4]:

$$c_p = \frac{TB}{6\sigma} \quad (10)$$

Prozessfähigkeit [DIE 14] bzw. Qualitätsfähigkeitskennzahl [VDA 4]:

$$c_{pk} = \text{Min} \left(\frac{oTg - \mu}{3\sigma}; \frac{\mu - uTg}{3\sigma} \right) \quad (11)$$

Prozessrobustheit (engl. process capability index) [CHA 88]:

$$c_{pm} = \frac{TB}{6\sqrt{(\sigma^2 + (\mu - m)^2)}} \quad (12)$$

TB Toleranzbreite: Betrag der Differenz von oberer Toleranzgrenze minus unterer Toleranzgrenze

σ Standardabweichung

μ Mittelwert

oTg obere Toleranzgrenze

uTg untere Toleranzgrenze

m Mittenwert: Wert in der Mitte von oberer Toleranzgrenze und unterer Toleranzgrenze (Symmetriepunkt)

Das *Prozesspotenzial* (engl. *process capability index*) c_p [VDA 4] gibt Auskunft darüber, ob die Verteilungsform des Prozesses innerhalb der Toleranzgrenzen liegen kann ($c_p \geq 1$): Dann ist das Prozesspotenzial erfüllt, ansonsten nicht ($c_p < 1$).

²⁹ Punkt zwischen der oberen und unteren Toleranzgrenze, vgl. Abbildung 2.8

³⁰ Wie auch in [WIN 13] angemerkt, existieren in der wissenschaftlichen Literatur unterschiedliche Begrifflichkeiten zur Bezeichnung der angegebenen Kennzahlen. Im weiteren Verlauf werden die angeführten Begriffe aus [DIE 14] verwendet.

Die *Prozessfähigkeit* (engl. *process capability index*) c_{pk} [VDA 4] beschreibt die Position des Mittelwertes der Verteilung bezogen auf die Verteilungsbreite (6σ) zu den Toleranzgrenzen.

Die Festlegung der Grenzwerte für die Kennzahlen erfolgt in der Regel individuell und firmenspezifisch. Eine allgemein gültige Festlegung gibt es demnach nicht, dennoch existieren Richtwerte für die Langzeitfähigkeit von Prozessen von $c_p \geq 1,33$ und $c_{pk} \geq 1,33$ sowie zur kurzfristigen, auch vorläufigen Prozessfähigkeit von $c_p \geq 2$ und $c_{pk} \geq 1,67$ (dies entspricht einem Abstand von mindestens 4 bzw. 5 Standardabweichungen vom Prozessmittelwert zur nächstgelegenen Toleranzgrenze) [DIE 14].

Die *Prozessrobustheit* (engl. *process capability index*) c_{pm} [CHA 88] kombiniert die Verteilungsbreite und die Lage des Mittelwerts zu den Toleranzgrenzen. Auf Grund des Ausnutzens der statistischen Grundsätze in der Serienproduktion müssen spitze, stark am Rand des Toleranzbandes liegende Prozessverteilungen vermieden bzw. erkannt werden, da sonst der Worst-Case-Fall³¹ ständig auftreten würde. Mittels dieses Prozesskennwertes können serienprozessuntaugliche Verteilungen herausgefiltert und die zugrunde liegenden Prozesse zielgerichtet optimiert werden.

Obwohl die statistische Prozesssteuerung ein weitverbreitetes Tool zur Überprüfung von Prozessen im Automobilbau, sowohl in der hauseigenen Produktion als auch im Zusammenspiel mit Zulieferteilen ist, hat diese einen entscheidenden Nachteil. Es muss eine reelle Stichprobe entnommen werden, bevor Aussagen über das Prozessverhalten gegeben werden können. Dies kann je nach Messaufwand ein entscheidender Zeitfaktor sein. Die Auswertung und Nutzung der Qualitätsregelkarten lässt maximal eine reaktive Prozesssteuerung zu und zusätzlich ist sie stark abhängig vom zuständigen Mitarbeiter [DIE 14]. Nach der erfolgten Warnung erfolgen noch die Auswertung und der Eingriff. Bevor ein Eingriff in den Prozess sich damit in den Bauteilen/Messdaten widerspiegelt ist schnell Ausschuss produziert (vgl. Abbildung 2.9).

3.3 Statistische Methoden zur Nutzung von Stichproben

In Großserien und Massenproduktionen können verschiedene mathematische Zusammenhänge verwendet werden um den Aufwand einer Analyse zu minimieren. Durch Entnahme einer Stichprobe gelingt es Aussagen über die Grundgesamtheit zu generieren, die jedoch immer an einen Vertrauensbereich geknüpft sind [VDA 4]. Umso wichtiger ist es die Stichprobengröße bewusst zu wählen. Für die hinreichend genaue Abschätzung des Mittelwertes eines Merkmals einer Grundgesamtheit reichen oft bereits fünf Teile als Stichprobe zur Prozessüberwachung aus [VDA 5], bzw. sogar nur drei wie es in der Praxis verbreitet ist; für die Bestimmung der Standardabweichung sind abhängig von der zulässigen Unsicherheit mehr Teile erforderlich [VDA 5]. Die Unsicherheit der Bestimmung der Standardabweichung lässt sich über das Konfidenzintervall oder Vertrauensbereich I

³¹ Worst-Case-Fall beschreibt den Fall der ungünstigsten möglichen Aufsummierung der Toleranzen innerhalb einer Toleranzkette

(Gleichung 13) [DIE 14] beschreiben. Für Stichproben größer 30 kann χ^2 auch durch die Verwendung der Standardnormalverteilung angenähert werden [PFE 10]. Ziel ist es, trotz Verwendung einer kleinen Stichprobe n das Intervall I möglichst klein zu halten, wodurch im Folgenden die χ^2 -Verteilung herangezogen wird.

$$I = \left[\sqrt{\frac{(n-1) \sigma_{sn}^2}{\chi^2_{n-1; 1-\frac{\alpha_I}{2}}}} \leq \sigma \leq \sqrt{\frac{(n-1) \sigma_{sn}^2}{\chi^2_{n-1; \frac{\alpha_I}{2}}}} \right] \quad (13)$$

- I Konfidenzintervall
- n Stichprobengröße
- α_I Irrtumswahrscheinlichkeit
- χ^2 Quantil der chi - Quadratverteilung
- σ_{sn} geschätzte Standardabweichung
- σ wahre Standardabweichung

Je nach Stichprobengröße n kann die wahre Standardabweichung der Grundgesamtheit σ stark von der Standardabweichung einer Stichprobe σ_{sn} abweichen. In Abbildung 3.4 ist der relative Fehler dieser über die Größe der gewählten Stichprobe aufgezeigt (Gleichung 14 hergeleitet aus Gleichung 13). Die Irrtumswahrscheinlichkeit α_I von 5 % wird von [GEN 10] als signifikant definiert und wird so in diesem Fall als ausreichend angenommen. Für eine typische Toleranzangabe im Karosseriebau von $\pm 0,5$ mm wird dies nach [BOH 12] eine Stichprobe größer 100 bedeuten um eine realistische Abschätzung zu erhalten. Nach Bohn et al [BOH 13] kann ab einer Stichprobe von 200 der Unterschied gänzlich vernachlässigt werden. Aber auch mittels kleinerer Stichproben können aussagefähige Analysen durchgeführt werden. Gemäß [VDA 5] ist es dann sinnvoll diesen Stichprobenumfang in unterschiedliche Stichproben aufzuteilen, um die Spannweite des Prozesses besser abzubilden.

$$\frac{\sigma}{\sigma_{sn}}(n; \alpha_I) = \frac{\left(\sqrt{\frac{(n-1)}{\chi^2_{n-1; 1-\frac{\alpha_I}{2}}}} + \sqrt{\frac{(n-1)}{\chi^2_{n-1; \frac{\alpha_I}{2}}}} \right)}{2} \quad (14)$$

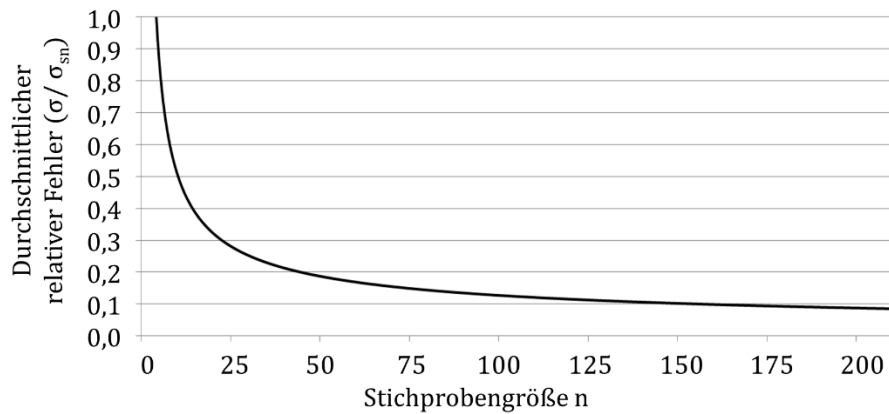


Abbildung 3.4: Durchschnittlicher relativer Fehler bei Verwendung einer Stichprobe zur Berechnung der Standardabweichung der Grundgesamtheit (gemäß Gleichung 14); Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$

3.4 Zentraler Grenzwertsatz normalverteilter Variablen

Nach dem zentralen Grenzwertsatz [KAM 18] gilt, dass die Summe unabhängiger, normalverteilter Zufallsvariablen immer einen weiteren normalverteilten Zufallswert bildet (Abbildung 3.5). Auch der Umkehrschluss gilt nach dem Satz von Cramér [HAZ 77]. Das bedeutet, dass durch Aufsummierung normalverteilter Fertigungsstreuungen im Produktionsprozess davon ausgegangen werden kann, dass die Merkmale der Zusammenbauten wiederum auch normalverteilt vorliegen, sowie andersherum.

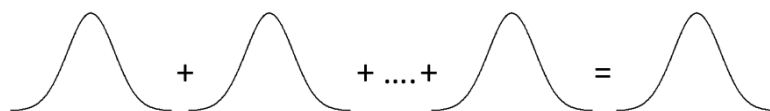


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung des zentralen Grenzwertsatzes

3.5 Statistische Versuchsplanung

Die statistische Versuchsplanung (auch bekannt als engl. Design of Experiments – DoE) ist eine weit verbreitete Methodik für Prozessuntersuchungen [SIE 10]. Für einen vollständigen h -stufigen Versuchsplan sind h^k Versuchseinstellungen umzusetzen. Als Beispiel ist bei einem 10-stufigen Versuchsplan (unterschiedliche Spannelemente) mit $k = 2$ Einstellmöglichkeiten (je 2 Einstellungen je Spannelement) bereits ein Versuchsplan mit 100 Einstellungen durchzuführen. Dies ist gerade im Karosseriebau auf Grund der Vielzahl der Spannelemente und deren Justagekombinationen nicht umsetzbar. Ein vielfach angewandtes Verfahren auf dem Gebiet der statistischen Versuchsplanung zur zielgerichtete Kombinationsreduzierung ist z.B. das „Latin Hypercubed Designs“ [MCK 79]. Hierbei werden Stichproben aus eingeteilten Intervallen genommen, um eine möglichst vollständige Abdeckung aller Wertebereiche einer Stellgröße zu gewährleisten. Dabei wird die Unabhängigkeit der Variablen vorausgesetzt. Die Anzahl der notwendigen Einstellungen kann damit drastisch bei ähnlicher Genauigkeit reduziert werden.

3.6 Zeitreihenanalysen

Auf Grund von zeitlichen Abfolgen im Prozess kann es vorkommen, an einem Zeitpunkt nicht ausreichende Informationen über eine benötigte Kenngröße zu haben. Zur Ermittlung der Werte für einen bestimmten Zeitpunkt gibt es verschiedene Verfahren, die sich grob in zwei Kategorien einteilen lassen:

- Interpolierende Verfahren (ermittelt Werte innerhalb des gesicherten Bereichs)
- Extrapolierende Verfahren (ermittelt Werte außerhalb des gesicherten Bereichs)

Bezogen auf den Anwendungsfall werden ausgewählte Vertreter im Folgenden vorgestellt:

Levenberg-Marquardt Fit-Algorithmus [LEV 44], [MAR 63]:

Der Levenberg-Marquardt Fit-Algorithmus gehört zu den numerischen Optimierungsalgorithmen. Der Algorithmus dient zur Lösung nichtlinearer Ausgleichsprobleme und nutzt dabei die Methode der kleinsten Quadrate (Gauß-Newton Verfahren). Ziel ist es eine Funktion $p(x)$ zu finden, die sich bestmöglich an die gegebenen Messwerte anschmiegt. Anschließend, lassen sich mittels der ermittelten Funktion auch Aussagen zwischen den einzelnen Messpunkten bilden.

Saisonfaktor [WIN 60]:

Der Saisonfaktor repräsentiert regelmäßig wiederkehrende Schwankungen in der Zeitreihe. Der Periodenzyklus kann dabei unterschiedliche groß sein. Nach Winters setzt sich die Prognose wie folgt zusammen:

$$p_{t+i} = (d_t + i b_t) s_{l,j} \quad (15)$$

p_{t+i} Prognosewert, berechnet zum Zeitpunkt t für den Zeitpunkt $t + i$, also für i Zeiteinheiten im Voraus

d_t Grundwert, berechnet zum Zeitpunkt t

b_t Trendfaktor, berechnet zum Zeitpunkt t

$s_{l,j}$ Saisonfaktor, berechnet zum Zeitpunkt $l = t-L + (i \bmod L)$, mit der Ordnungsnummer $j = (t+i) \bmod L$ (L = Länge eines Saisonzyklus)

Gleitender Mittelwert [KRE 06]:

Der gleitende Mittelwert ist die einfachste Form eines Prognoseverfahrens außerhalb des gesicherten Bereichs und wird wie folgt gebildet:

$$p_t = \frac{1}{P} \sum_{n=1}^P q_{t-n} \quad (16)$$

p_t : Prognosewert für Periode t ,

P : Anzahl der betrachteten vergangenen Perioden,

q_t : tatsächlich abgerufene Menge der vergangenen Periode

Jede vergangene Periode fließt mit derselben Gewichtung in die prognostizierte Periode ein. Dieses Prognoseverfahren eignet sich für eine kurzfristige Vorhersage der nächsten Periode.

Exponentielle Glättung 2. Ordnung [TEM 16]:

Die exponentielle Glättung zweiter Ordnung eignet sich zur Prognose außerhalb des gesicherten Bereichs von volatilem Verhalten bei gleichzeitigem Trendverhalten. Besonders bei diesem Verfahren ist es, dass die vorangegangenen Werte mit zunehmenden Alter weniger gewichtet werden. Je größer ein Glättungsfaktor α_G ($0 < \alpha_G < 1$) gewählt wird, desto stärker fällt der Einfluss der neusten Werte aus.

3.7 Korrelation

Die Korrelation zweier normalverteilter Merkmale X und Y lässt sich wie folgt beschreiben [HAR 09]:

$$r_{XY} = \frac{Cov(X,Y)}{\sqrt{Var(X)*Var(Y)}} \quad (17)$$

mit

Var(X) Varianz der Werte von Merkmal X

Var(Y) Varianz der Werte von Merkmal Y

Cov(X, Y) Kovarianz der Werte von Merkmal X und Y

Der Korrelationskoeffizient r_{XY} liegt immer im Intervall [0; 1]. Je näher der Korrelationskoeffizient zu 1 ist, desto stärker ist der lineare Zusammenhang der Merkmale. Nach Brosios [BROS 98] lassen sich die Korrelationswerte als Richtwerte wie folgt einteilen:

- $0,0 < r_{XY} \leq 0,2$ sehr schwache Korrelation
- $0,2 < r_{XY} \leq 0,4$ schwache Korrelation
- $0,4 < r_{XY} \leq 0,6$ mittlere Korrelation
- $0,6 < r_{XY} \leq 0,8$ starke Korrelation
- $0,8 < r_{XY} \leq 1$ sehr starke Korrelation

Mittels des Korrelationskoeffizienten kann nur ein linearer Zusammenhang belegt oder widerlegt werden, jedoch keine Aussage über den nichtlinearen Zusammenhang der beiden Merkmale getroffen werden. Vor allem bei vorliegenden Wechselwirkungen ist eine ausführliche Analyse der Daten unumgänglich [KÄH 08].

III Modellierung

4. Methode zur Robustheitssteigerung einer Heckdeckelproduktion

Im Folgenden wird eine neu entwickelte Methode zur objektivierten Robustheitssteigerung von fugenbildenden Anbauteilen im Karosseriebau vorgestellt, anhand derer im Sinne einer Bottom-Up Perspektive die Prozesse entsprechend der Maßhaltigkeiten der Einzelteile angepasst werden, um das gleichmäßige Erscheinungsbild von Fugen und Übergängen innerhalb einer Fahrzeugflotte zu stärken. Die Umsetzung der Methode erfolgt werkerunabhängig und ist mit leichten Modifikationen auf verschieden gestaltete Anlagen, speziell im Bereich von Türen und Klappen, übertragbar. In diesem Kapitel wird die Struktur der Methode vollständig aufgezeigt. Im Kapitel 5 werden die Details der Methode erläutert und am Beispiel einer Heckdeckelfertigung eines Premiumherstellers demonstriert.

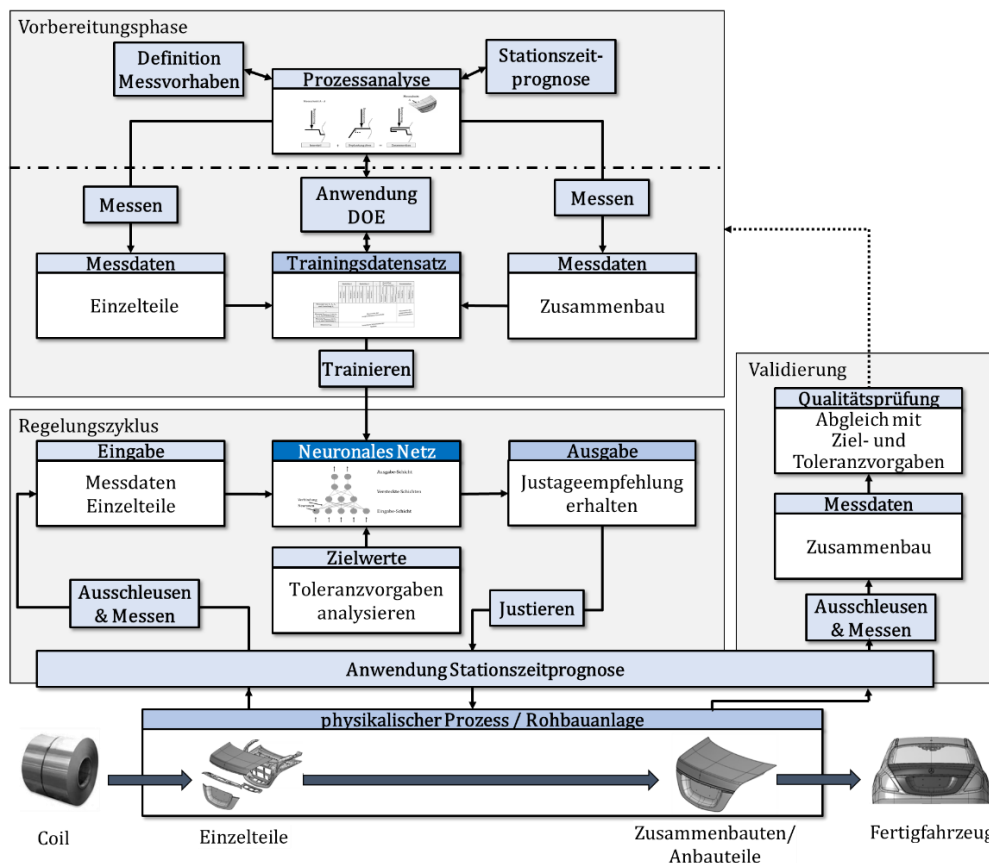


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der entwickelten Methode zur Objektivierung und Optimierung eines Qualitätsregelkreises im Karosseriebau von fugenbildenden Anbauteilen

Abbildung 4.1 veranschaulicht die entwickelte Methode. Durch Einsatz der Methode kann produktionsbegleitend durch Justage der Spannelemente maßhaltigkeitssteigernd in den

Prozess eingegriffen werden, wobei die Justageempfehlungen durch selektive Messungen und Berechnungen eines zuvor trainierten neuronalen Netzes ermittelt werden. Eine entsprechende Vorbereitungsphase dient dazu über eine Prozessanalyse ein Messkonzept zu entwickeln um einen Messdatensatz zu erzeugen und das neuronale Netz zu trainieren. Das neuronale Netz stellt wiederum die Basis für den Regelungszyklus dar. Über eine Stationszeitprognose wird der Regelungszyklus mit dem physikalischen Prozess (der Rohbauanlage) gekoppelt. Die Stationszeitprognose dient dazu Bauteile für Messvorgänge taktgenau ein- und auszuschleusen, sowie Shimseinstellungen zeitlich gerichtet an der Anlage durchzuführen. Die Einzelteilmessdaten als Eingabe für das neuronale Netz sind regelmäßig mit vorhandener Messtechnik zu ermitteln. Die Zielwerte sind entsprechend den gewünschten Bauteil- und Fugenmaßen zu definieren. Darauf basierend erfolgt die Berechnung der Justageempfehlungen. Über eine Validierungsphase kann bei Bedarf das Netz nachtrainiert werden, um die Berechnungsergebnisse zu optimieren. Das nachtrainierte Netz ist dann die neue Basis für den kommenden Regelungszyklus. Abbildung 4.2 schlüsselt die einzelnen Schritte der drei Phasen noch einmal auf.

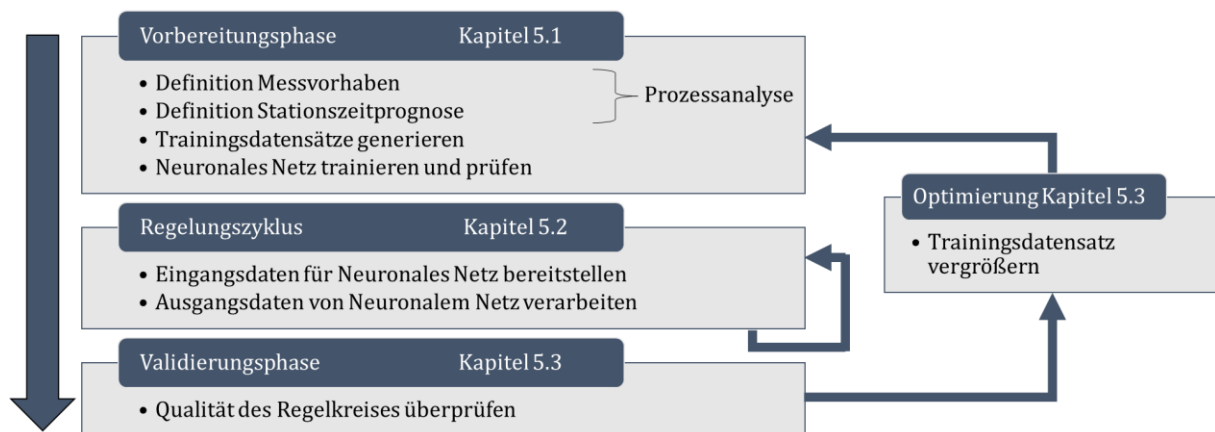


Abbildung 4.2: Die Methode gliedert sich in drei Hauptbereiche: Vorbereitung, Regelung und Validierung (Detaillierung im jeweils angegebenen Kapitel)

4.1 Vorbereitungsphase

Die Vorbereitungsphase ist einmalig bei Neuanlage des Regelkreises in der jeweiligen Anlage durchzuführen. Die Abfolge der Schritte ist in Abbildung 4.3 nachzuvollziehen, die Detailerläuterungen befinden sich in Kapitel 5.1. Die Vorbereitungsphase ist sehr gründlich zu absolvieren, da sie den Grundstein für die Qualität des Regelergebnisses legt. Zu Beginn sind grundlegende Analysen an der ausgewählten Anlage durchzuführen, wobei sowohl die Bauteile selbst (Definition Messvorhaben – siehe Kapitel 5.1.1) als auch die Logistikprozesse (Durchführung Stationszeitprognose – siehe Kapitel 5.1.2) untersucht werden. Anschließend sind die Trainingsdatensätze auf Basis eines Versuchsplans nach DoE-Methodik zu erstellen (Trainingsdatensätze generieren - siehe Kapitel 5.1.3). Abschließend wird das neuronale Netz als Regelbasis erstellt und dessen Qualität überprüft (Neuronales Netz trainieren und prüfen - siehe Kapitel 5.1.4).

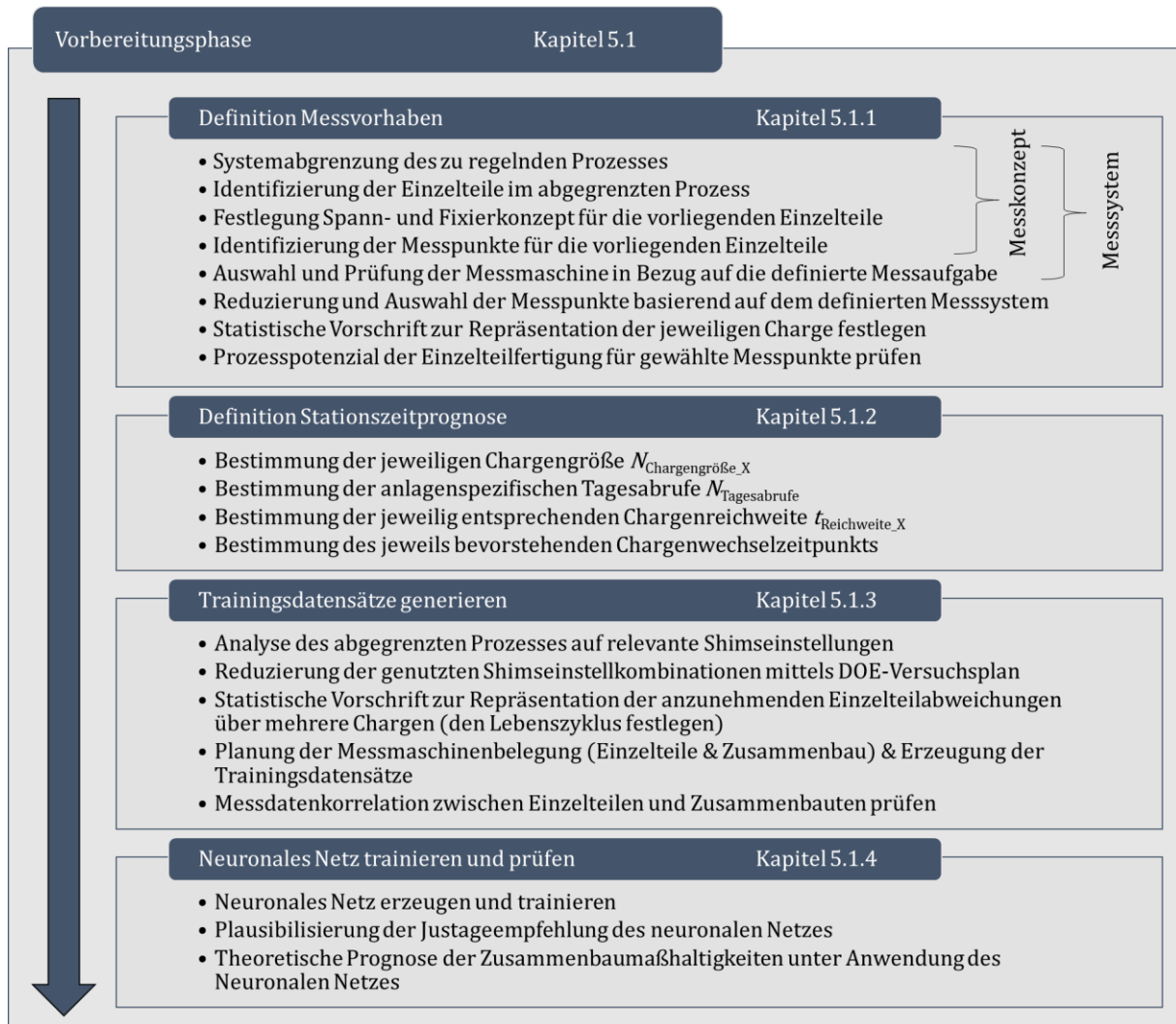


Abbildung 4.3: Die Vorbereitungsphase gliedert sich in vier Abschnitte, die anlagenspezifisch abzuarbeiten sind (Detaillierung im jeweils angegebenen Kapitel).

4.2 Regelungszyklus

Abbildung 4.4 zeigt den Verlauf des Regelungszyklus, welcher in Kapitel 5.2 erläutert wird. Dieser Regelungszyklus ist permanent in anlagenabhängigen Abständen zu wiederholen. Entsprechend der Stationszeitprognose der jeweiligen Charge sind die Einzelteile aus dem Presswerk als Eingangsdaten für das neuronale Netz zu vermessen und die Zielwerte der Zusammenbauten anhand der sich ergebenden Fugen an der Karosserie festzulegen. Die theoretisch berechnete Shimseinstellung ist an die real möglichen Shimseinstellungen hin anzupassen. Anschließend ist die Justage auf Basis der erneuten Stationszeitprognose zielgerichtet in der Anlage durchzuführen.

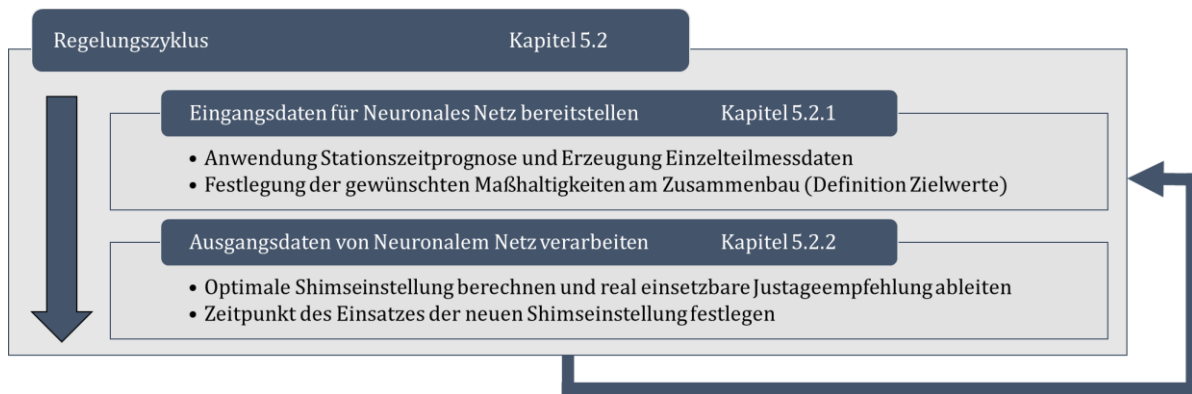


Abbildung 4.4: Der Regelungszyklus gliedert sich in zwei Abschnitte und ist in einem anlagenabhängigen Rhythmus zu wiederholen (Detaillierung im jeweils angegebenen Kapitel).

4.3 Validierungsphase

Zu festgelegten, anlagenabhängigen Zeitpunkten ist eine Validierung des Regelungssystems durchzuführen. Abbildung 4.5 zeigt die Inhalte der Überprüfung der Qualität des Regelkreises, die in Kapitel 5.3 erläutert werden. Die erzeugten Zusammenbauten müssen vermessen und ein Abgleich mit den Ziel- und Toleranzvorgaben durchgeführt werden. Darauf basierend ist zu entscheiden, ob und in welchem Umfang die Trainingsdatensätze zu erweitern sind und gegebenenfalls das neuronale Netz durch ein optimiertes Netz auszutauschen ist.

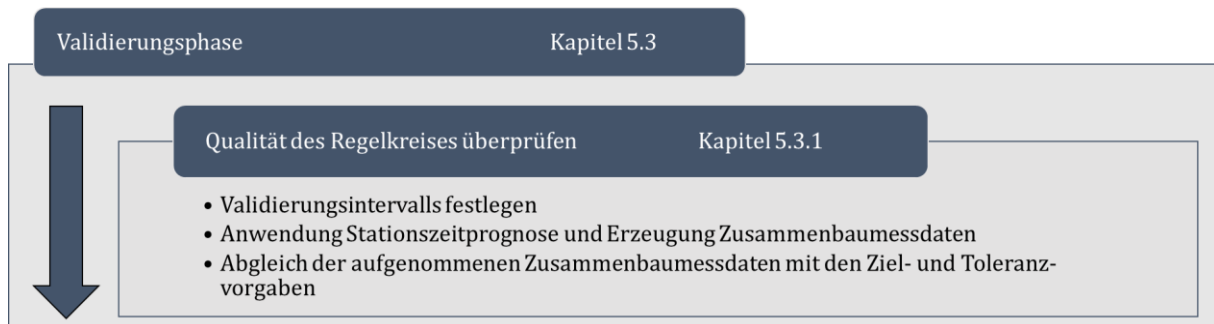


Abbildung 4.5: Die Validierung dient zur Überprüfung der Qualität des Regelkreises (Detaillierung im jeweils angegebenen Kapitel)

5. Konkretisierung der entwickelten Methode

Die entwickelte Methode aus Kapitel 4 wird im folgenden Kapitel weiter detailliert. Um die Methode anschaulich zu erläutern wird eine Heckdeckelanlage ausgewählt. Die ausgewählte Anlage ist ein abgeschlossener Prozess und zeichnet sich durch die Verwendung gängiger Fügeverfahren wie Laserschweißen, Falzen und Kleben sowie einer gewissen geometrischen Komplexität des zu fertigenden Zusammenbaus aus.

5.1 Vorbereitungsphase

Die Vorbereitungsphase ist bei jeder Neuintegration der Methode anlagenspezifisch durchzuführen. Dabei ist es irrelevant, ob es eine bestehende Anlage mit laufendem Prozess oder eine Neuanlage ist.

5.1.1 Definition Messvorhaben

Systemabgrenzung des zu regelnden Prozesses

Klare Systemgrenzen zu definieren hilft den zu regelnden Prozess herauszuarbeiten und gegenüber anderen Prozessen und -einflüssen abzugrenzen. Die vorliegende Methode ist anwendbar auf die Anbauteilefertigung. Der Fokus hier liegt auf den Einzelteilen, die aus dem Presswerk angeliefert werden, aus denen im ausgewählten Prozess ein abgeschlossener Zusammenbau entstehen wird, bevor dieser in der Endmontage an die Karosserie gefügt werden.

Anwendung:

Abbildung 5.1 zeigt entsprechend die Systemabgrenzung am Beispiel der vorliegenden Heckdeckelfertigung.

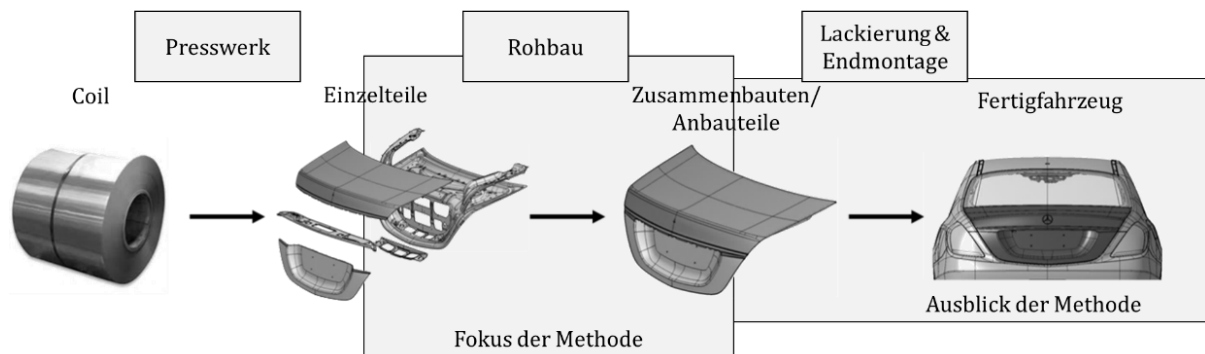


Abbildung 5.1: Systemabgrenzung des zu regelnden Prozesses am Beispiel der vorliegenden Heckdeckelfertigung. Fokus der Methode ist das Zusammenfügen der Einzelteile zum Zusammenbau im Rohbau.

Der Fokus der vorliegenden Arbeit wird auf die maßhaltige Erstellung des Heckdeckels gelegt, wobei sich die geforderte Maßhaltigkeit auf die konstruierte Sollgeometrie und die entwicklungsseitig definierten Toleranzvorgaben bezieht. Die weitere Ausarbeitung der Methode bzgl. der Optimierung der Fugenmaße am Fertigfahrzeug wird als Ausblick the-

matisiert, denn hier spielen zur Ermittlung der individuell geforderten Sollgeometrie neben der zwingenden Maßhaltigkeiten der Zusammenbauten auch weitere Effekte z.B. der Dichtung und der Schlosskinematik eine wesentliche Rolle was ein komplett anderes Forschungsfeld eröffnet.

Identifizierung der Einzelteile im abgegrenzten Prozess

Die in der Entwicklungsphase des Fahrzeugs festgelegten Fügeleitlinien dienen zur Übersicht über die benötigten Einzelteiltypen, verwendeten Fügeverfahren und Fügefolgen des abgegrenzten Prozesses.

Anwendung:

Im vorliegenden Beispiel sind dies sieben Einzelteiltypen (Abbildung 5.2):

$$N_{\text{Anzahl_Einzelteiltypen}} := 7 \tag{18}$$

Dabei bilden die Beplankung oben, das Verschlussblech und die Beplankung unten mittels Laserschweißverfahren einen Unterzusammenbau. Ein anderer Unterzusammenbau wird aus dem Innenteil und den Verstärkungsteilen hergestellt. Mit dem Hybridverfahren Klebe-Falzen (siehe Kapitel 2.1.1) werden beide Unterzusammenbauten zu einem fertigen Heckdeckel zusammengefügt.

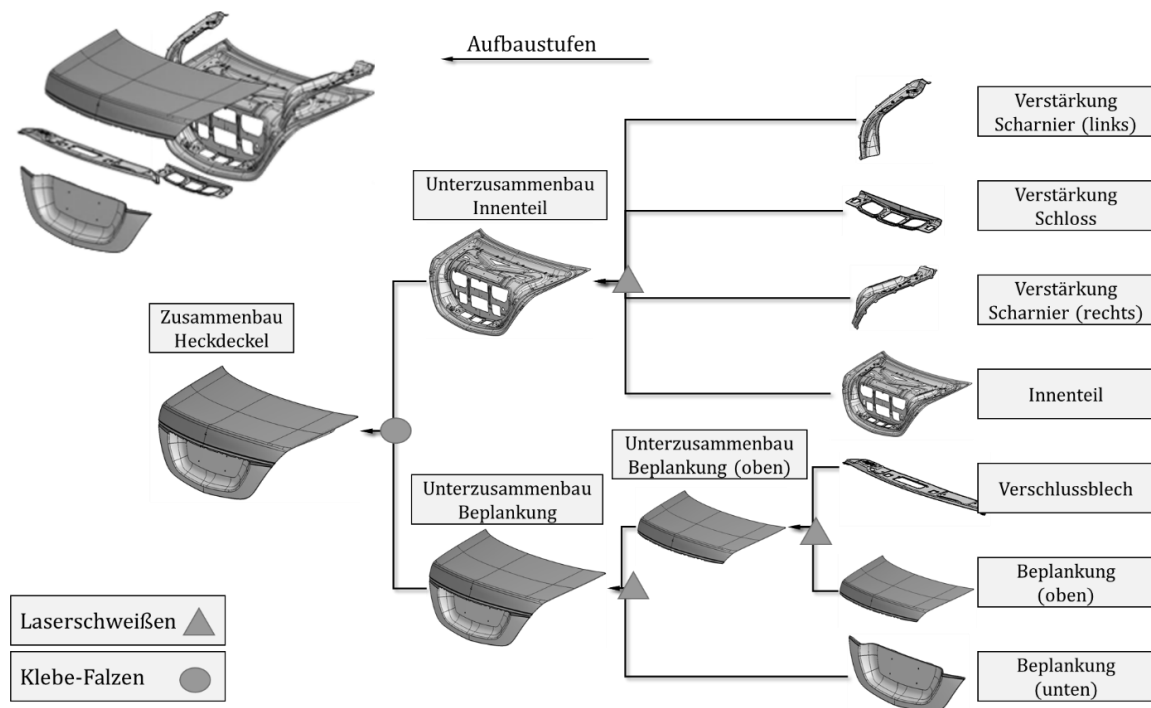


Abbildung 5.2: Übersicht der Fügeleitlinien am Beispiel der vorliegenden Heckdeckelfertigung.

Festlegung Spann- und Fixierkonzept für die vorliegenden Einzelteiltypen

Die Festlegung des Spann- und Fixierkonzepts hat gemäß dem 3-2-1 Prinzip (siehe Kapitel 2.1.2) für jeden Einzelteiltyp individuell zu erfolgen. Bei einer bestehenden Anlage ist

das bereits festgelegte und mit den Fügevorrichtungen abgestimmte Konzept zu verwenden.

Anwendung:

Beim vorliegenden Heckdeckel wurde das Spann- und Fixierkonzept entsprechend des vorgestellten 3-2-1 Prinzips aufgestellt. Abbildung 5.3 zeigt die sieben Einzelteiltypen des Heckdeckels mit den jeweils gewählten Spann- und Fixierpunkten. Auf Grund der Größe und Flexibilität der Bauteile finden hierbei Hilfsausrichtpunkte Anwendung (vgl. Kapitel 2.1.2).

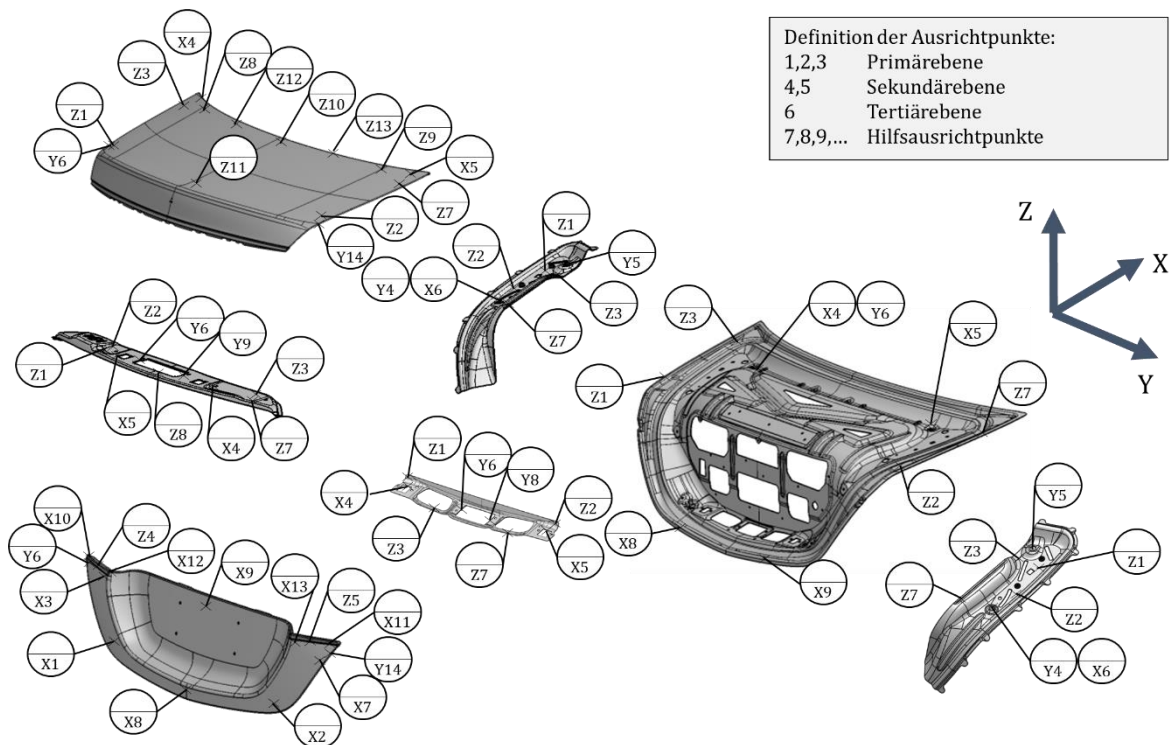


Abbildung 5.3: Spann- und Fixierkonzept gemäß des 3-2-1 Prinzips am Beispiel der sieben Einzelteiltypen der vorliegenden Heckdeckelfertigung.

Identifizierung der Messpunkte für die vorliegenden Einzelteile

Die Definition und gezielte Auswahl der Messpunkte hat zum Ziel sowohl in der Vorbereitungsphase als auch während des Regelungszyklus ausreichend Kenntnisse über die Bauteile, deren Verhalten und Wechselwirkungen mit dem Fügeprozess mittels experimenteller Messung erhalten zu können. Wie Keller [KEL 14] darlegt sind genau diese Wechselwirkungen jedoch schwer zu fassen. Ein justiertes Spannelement beeinflusst nicht nur die lokale Zone sondern hat globalere Auswirkungen auf den Zusammenbau. Und auch der Umkehrschluss gilt, dass eine geometrische Maßabweichung nicht nur lokal eine geometrische Maßänderung am Zusammenbau bewirkt. Generell lässt sich aber sagen, dass je deutlicher die Beziehungen zwischen den Messdaten der Einzelteile und den Messdaten der Zusammenbauten bzw. dem Prozess ist, desto einfacher wird der Trainingsalgorithmus Zusammenhänge abbilden und den Netzwerkfehler in der Testphase minimieren

können [KRI 07]. Dementsprechend sind die Messpunkte in so genannte Messschnitte einzuteilen (Abbildung 5.4). Dieses Vorgehen der Messpunkt festlegung ist vor allem bei fugenbildenden Bauteilen verbreitet, da so eine durchgängige Dokumentation (bei entsprechender durchgängiger Vererbung des Spann- und Fixierkonzepts, s.o.) vom Einzelteil bis hin zur Fuge am Fertigfahrzeug gewährleistet werden kann. Auf Grund der Relevanz dieser Bereiche am Fertigfahrzeug ist hier oftmals auch eine der größten Toleranzeinschränkungen an den Einzelteilen und Unterzusammenbauten zu verzeichnen.

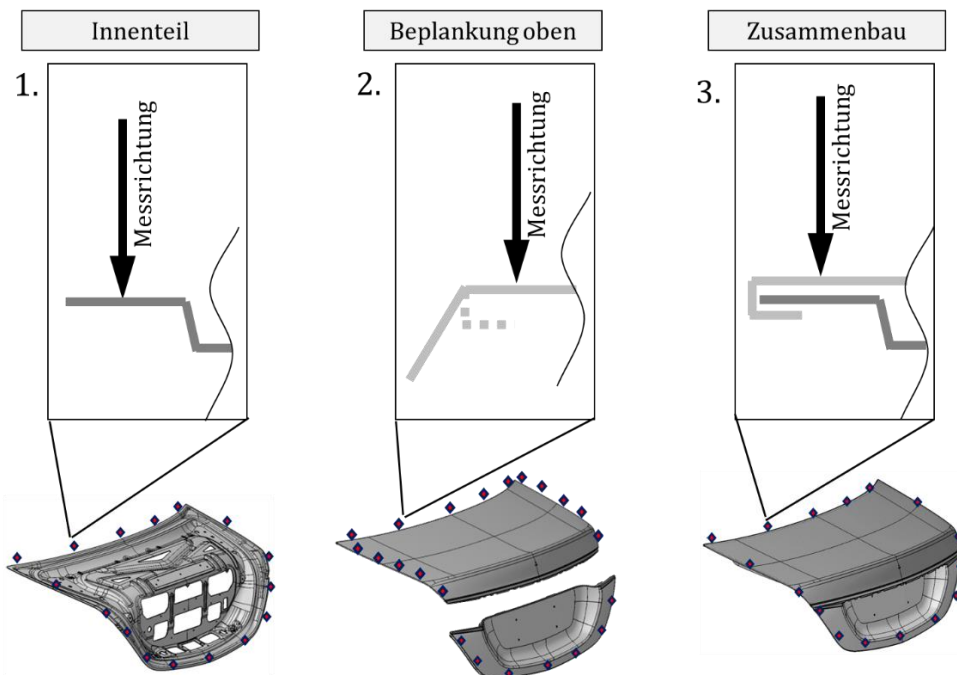


Abbildung 5.4: Schematische Darstellung eines durchgängigen Messchnitts am Beispiel der vorliegenden Heckdeckelfertigung. Links und Mitte: Einzelteilmesspunkt; Rechts: Zusammenbaumesspunkt.

Darüber hinaus sind weitere Toleranzeinschränkungen bei fugenbildenden Anbauteilen an Dichtflächen und Schweißflächen von formstabilen Einzelteilen gängig. Dies resultiert z.B. daraus, dass auf der einen Seite die Robustheit einer Dichtung bzgl. Fertigungsschwankungen im Karosseriebau oftmals direkt mit der Kostenfrage einhergeht. Und auf der anderen Seite werden auf Grund ihrer geometrischen Eigenschaften formstabile Bauteile höhere Eigenspannungen im Fügeprozess durch geometrische Maßabweichungen im Einzelteilstadium außerhalb der Toleranzen ausbilden. Dies wiederum kann zu unkontrollierten maßlichen Veränderungen nach Entlastung der Spannelemente führen. Formstabile Bauteile weisen eine höhere Blechdicke, ggf. bei Wahl eines anderen Materials auch einen höheren E-Modul, sowie vor allem geometrische Versteifungen wie Sicken und Verprägungen über mehrere Ziehstufen hin auf. Abbildung 5.5 zeigt die formstabilen Bauteile, die in der vorliegenden Heckdeckelfertigung verbaut werden.

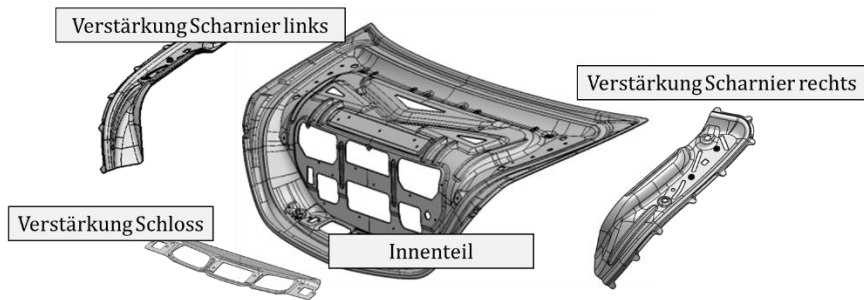


Abbildung 5.5: Darstellung der formstabilen Einzelteile der vorliegenden Heckdeckelfertigung.

Tabelle 3 zeigt am Beispiel der sieben Einzelteiltypen der vorliegenden Heckdeckelfertigung einen Überblick über die verwendeten Materialien, Blechdicken sowie Häufung von Sicken und Verprägungen. Die Beplankungsteile können im Gegensatz zu den formstabilen Bauteilen als Außenhautteile keine Verprägungen aufweisen. Sie sind meist charakterisiert durch große ebene Flächen mit geringer Materialdicke, da sie der gegebenen Designsprache folgen und dabei so wenig wie möglich zusätzliches Gewicht ins Fahrzeug bringen dürfen. Damit die Bauteile auch im nichtverbauten Zustand in Form bleiben sind große Flächen meist leicht bombiert (gewölbte Form).

Tabelle 3: Überblick verwendeter Materialien, Blechdicken und Versteifungen am Beispiel der sieben Einzelteiltypen der vorliegenden Heckdeckelfertigung; mit * markierte Bauteile gelten im vorliegenden Kontext als formstabiler Einzelteiltyp.

Bauteil /Kennwert	Material	Blechdicke in mm	Vorkommen von Sicken und Verprägungen
Innenteil*	Alu-Leg.	1,22	Über das gesamte Bauteil verteilt, Herstellung über mehrere Ziehstufen hinweg.
Verstärkung Schloss*	Alu-Leg.	1,5	
Verstärkung Scharnier*^(2x)	Alu-Leg.	1,5	
Beplankung oben	Alu-Leg.	1	Nur Abstimmung der umlaufenden Falzkante sowie Schweißbereich mit Verschlussblech, leichte Bombierung.
Beplankung unten	Alu-Leg.	1	
Verschlussblech	Alu-Leg.	1,15	Nur Abstimmung der umlaufenden Schweißbereiche mit den Beplankungsteilen.

Demnach ergeben sich zur Festlegung von Messpunkten folgende Kriterien:

- Durchgängige Messschnitte vom Einzelteil zum Fertigfahrzeug in fugenbildenden Bereichen
- Messpunkte auf Dichtflächen
- Messpunkte auf Schweißflächen

Abbildung 5.6 zeigt die nach dem oben beschriebenen Vorgehen definierten Messpunkte am Beispiel der vorliegenden Heckdeckelfertigung. Die Messpunkte am Zusammenbau entsprechen den nach dem Verbau noch erreichbaren Messpunkten.

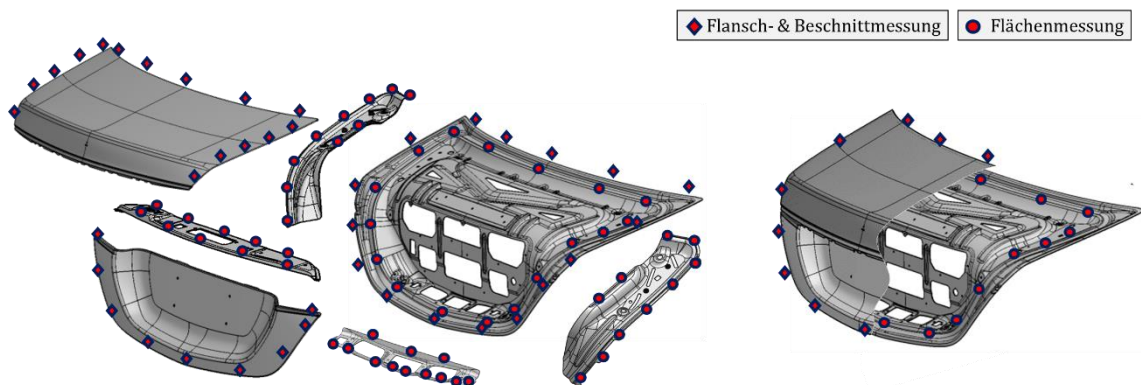


Abbildung 5.6: Schematische Darstellung der festgelegten Messpunkte am Beispiel der sieben Einzelteiltypen der vorliegenden Heckdeckelfertigung (insgesamt 195 Messungen aufgeteilt nach Flansch- & Beschnittmessung, Flächenmessung und Lochmessung (vgl. Kapitel 2.1.2)).

Als Beispiel für mögliche Wechselwirkungen/Korrelationen zwischen den Einzelteilen selbst, Fügeprozess und den Messdaten am Zusammenbau wird anhand der vorliegenden Heckdeckelfertigung beispielhaft der Einfluss der Scharnierverstärkungen am Innenteil auf die Heckdeckelmaßhaltigkeit beschrieben. Hierzu stehen jeweils Messdaten aus zwei chargenidentischen Einzelteilkombinationen³² zur Verfügung. Sowohl das Innenteil als auch die Scharnierverstärkungen gehören den formstabilen Bauteilen an. In den seitlichen Bereichen am Innenteil weichen die geometrischen Maß vor allem im Bereich, wo später die Scharnierverstärkungen angeschweißt werden, überwiegend in dieselbe Richtung zwischen den beiden Chargen ab. Die Scharnierverstärkungen hingegen haben sich über den Chargenwechsel eher gegenläufig verändert (Abbildung 5.7). Der Innenwinkel an der linken Scharnierverstärkung wird kleiner, der Innenwinkel an der rechten Verstärkung größer. Dies wird durch die Messdatenunterschiede zwischen Verbauversuch 1 und Verbauversuch 2 am Zusammenbau unterstrichen, wo auch asymmetrische Veränderungen zu sehen sind. Da die Verstärkungen eine Blechdicke von 1,5 mm aufweisen lässt sich so vermuten, dass sie einen nicht unerheblichen maßhaltigkeitsbestimmenden Einfluss

³² Worterklärung „chargenidentische Einzelteilkombination“ siehe Abbildung 5.11

auf das Innenteil im angeschweißten Bereich und damit auf den gesamten Zusammenbau in den seitlichen Bereichen haben.

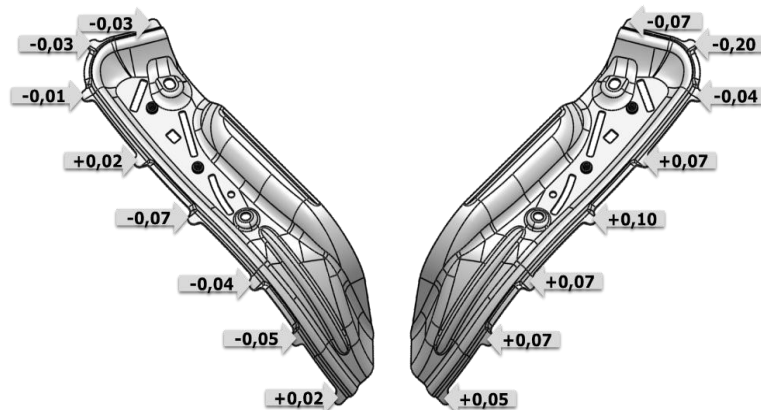


Abbildung 5.7: Schematische Darstellung der Mittelwertdifferenz zwischen den Beispielchargen exemplarisch für die Flächenmessungen an den Scharnierverstärkungen der vorliegenden Heckdeckelfertigung, Werte in mm.

Darüber hinaus finden sich auch lineare Korrelationen in den einzelnen Messdaten der vorliegenden Heckdeckelfertigung zwischen Einzelteilmesspunkten und Zusammenbaumesspunkten. Insgesamt weist in den zwei aufgenommenen Beispielchargen rund die Hälfte der Messpunktekombinationen (jeder Einzelteilmesspunkt mit jedem Zusammenbaumesspunkt) zumindest eine schwache Korrelation auf, 1,2 % der Messpunktkombinationen weisen eine starke Korrelation auf. Dabei haben 85 % der Einzelteilmesspunkte mindestens einen Zusammenbaumesspunkt mit dem sie mindestens eine mittlere Korrelation aufweisen. Ein Nachteil des Korrelationskoeffizienten ist jedoch, dass er nur auf lineare Zusammenhänge verweisen kann (vgl. Kapitel 3.7). Im komplexen Karosseriebau liegen hingegen auch und ggf. vor allem nichtlineare Zusammenhänge und Wechselwirkungen vor. Zusätzlich ist zu bedenken, dass die Messdaten mit Fertigungsprozessstreuungen und Messunsicherheiten belegt sind, die schnell lineare Zusammenhänge überdecken.

Entsprechend des Black-Box Charakters eines neuronalen Netzes [KRI 07], wird schwer zu ermitteln sein, wie das neuronale Netz diese Beziehungen und Korrelationen verarbeitet. Jedoch ist über das Vorliegen dieser und ähnlicher Zusammenhänge ein zielgerichtetes Training eines neuronalen Netzes erst möglich. Nach Kriesel [KRI 07] spielt bei der Zusammenstellung der Trainingsdaten die Verschiedenheit der Trainingsdaten³³ eine größere Rolle als die 100-prozentige Wahl der richtigen Messpunkte als Repräsentant der

³³ Entspricht im vorliegenden Fall einer großen Bandbreite an unterschiedlichen geometrischen Maßabweichungen der Einzelteile, dies kann gewährleistet werden durch Verwendung unterschiedlicher Chargen je Einzelteiltyp.

stärksten Korrelationen, was nämlich bei fehlender Vielfalt schnell zu Auswendiglernen statt erfolgreichem Generalisieren führt.

Da jeder Messpunkt vor allem beim taktilen Messen direkt in die benötigte Messzeit eines Bauteils eingeht, ist es naheliegend, dass dementsprechend eine geringere Anzahl an Messpunkten wünschenswert ist. Dennoch ist zum Zeitpunkt der Erstellung der Trainingsdaten nur sehr wenig über die Wechselwirkungen bekannt, daher sollte in dieser Phase eher mit einer größeren Anzahl an Messpunkten analog der beschriebenen Vorgehensweise begonnen werden. Ist das Netz erst einmal trainiert, lässt sich mittels einer Sensitivitätsanalyse (vgl. Kapitel 2.2.1.1) die Messpunkteanzahl nochmals bei Bedarf reduzieren [BOR 03].

Auswahl und Prüfung der Messmaschine in Bezug auf die definierte Messaufgabe

Wie in den Grundlagen (vgl. Kapitel 2.1.2) beschrieben sind verschiedene Messmaschinen/-verfahren im Karosseriebau verbreitet, die sich auch grundsätzlich für die vorliegende Methode eignen. Die Aufspannfläche der Messmaschine muss für die vorliegenden Einzelteiltypen ausreichend groß und die anlagenspezifische Schnelligkeit und Genauigkeit des Messarms sowie die Verarbeitung der Daten an die Messumfänge angepasst sein. Die optischen Messmethoden weisen bei der Schnelligkeit gegenüber den taktilen Methoden oftmals Vorteile auf, was gerade bei großen Messumfängen das Vorhaben beschleunigen kann. Die spezifische Geschwindigkeit des gesamten Messvorgangs ist dabei anlagenspezifisch abhängig vom programmierten Wegverlauf und der Erreichbarkeit der Messpunkte. Neben der Grobauswahl der Maschine ist diese hinsichtlich ihrer Messmittelfähigkeit in Bezug auf die vorliegenden Einzelteiltypen, das definierte Spann- und Fixierkonzept, sowie die Messpunkte hin zu prüfen. Die Messmittelfähigkeit ist bestätigt, wenn die (Mess-)Prozesswiederholgenauigkeit (PWG) der Messmaschine bzgl. des zu messenden Merkmals gemäß dem Verfahren in Kapitel 2.1.2 die „goldene Regel der Messtechnik“ (vgl. Kapitel 2.1.2) zufriedenstellend erfüllt.

Anwendung:

Im vorliegenden Beispiel wird entsprechend den Gegebenheiten eine taktile Koordinatenmessmaschine für die Vermessung der Einzelteile eingesetzt. Zur Vermessung der Zusammenbauten steht ein optisches anlagenintegriertes Messsystem zur Verfügung. Um die Vergleichbarkeit der Messwerte bezüglich definierter gemeinsamer Messschnitte/-koordinaten trotz unterschiedlicher Messmaschinen zu gewährleisten, werden zum Abgleich der Messsensoren je fünf Zusammenbauten zusätzlich auf der taktilen Koordinatenmessmaschine vermessen um systematische Messabweichungen auszuschließen. Die Ausrichtung und die Einspannung der Einzelteile und der Zusammenbauten erfolgt nach dem definierten Spann- und Fixierkonzept (s.o.). Die ermittelte PWG liegt im Mittel über alle aufgenommenen Messpunkte unter 0,03 mm. Mit der Erfüllung der „goldenen Regel der Messtechnik“ (vgl. Kapitel 2.1.2) auf Basis der im Entwicklungsprozess festgelegten durchschnittlichen Toleranzbreite kann nach [KEF 15] hiermit ein erster Anhaltspunkt

zur Eignung des definierten Messprozesses für die bestimmte Anwendung gegeben werden.

Reduzierung und Auswahl der Messpunkte basierend auf dem definierten Messsystem

Das Training des neuronalen Netzes ist abhängig davon, Zusammenhänge zwischen den geometrischen Maßabweichungen der Einzelteile und der dazugehörigen Zusammenbauten sowie dem Prozess zu erkennen und in den Gewichten zu speichern. Hierbei spielt die Messunsicherheit des Messprozesses zur Ermittlung dieser geometrischen Maßabweichungen eine entscheidende Rolle, je größer die Unsicherheit desto schwieriger ist es Zusammenhänge zu erkennen. Entsprechend der ermittelten Prozesswiederholgenauigkeit je zu vermessenem Merkmal, in Bezug auf die jeweils entwicklungsseitig definierte Toleranzvorgabe zur Erreichung der Produktionsziele am Fertigfahrzeug in diesem Bereich, sind die gewählten Messpunkte zu bewerten. Kann ein gewähltes Merkmal mit dem gewählten Messprozess nicht ausreichend reproduzierbar vermessen werden, ist dieses Merkmal aus dem Messprogramm auszuschließen, da kein Mehrwert für das Training des neuronalen Netzes zu erwarten ist. Bei diesem Schritt ist jedoch kritisch zu hinterfragen, wie relevant der Messpunkt für den vorliegenden Fertigungsprozess und wie groß damit der Einfluss auf den Zusammenbau ist. Obwohl bereits die grundsätzliche Eignung des aufgestellten Messsystems nachgewiesen worden ist, ist vor allem, wenn die auszufilternden Merkmale überwiegend auf Dichtflächen, in fugenbildenden Bereichen oder auf formstabilen Bauteilen liegen, das Messsystem nach den oben beschriebenen Schritten erneut zu hinterfragen. Bereits durch kleine Änderungen am System oder an der Spannreihenfolge und/oder -position lässt sich die Messmittelfähigkeit verändern.

Anwendung:

Im vorliegenden Fall betreffen diesen Sachverhalt vor allem Merkmale in den in Abbildung 5.8 aufgezeigten Bereichen. Die Messvorgänge zur Ermittlung der Geometrieelemente wie Loch- und Ausschnittmessungen sowie in den Bereichen der Griffleiste an der Beplankung oben wie unten erreichen keine ausreichende Messgenauigkeit entsprechend den genannten Kriterien (Messunsicherheit größer 10 % des vorgegebenen Toleranzbandes).

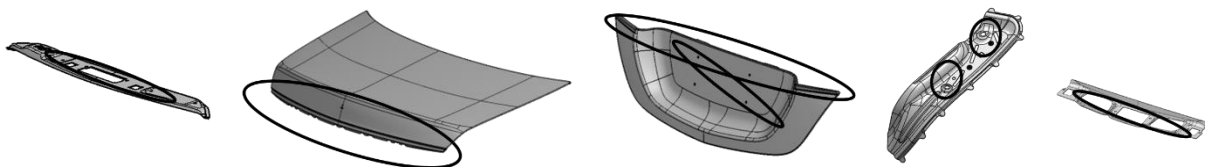


Abbildung 5.8: Messpunktbereiche, die die Prozesswiederholgenauigkeit nicht erfüllen am Beispiel der sieben Einzelteiltypen der vorliegenden Heckdeckelfertigung.

Nach den oben definierten Kriterien sind diese Merkmale jedoch auch nicht zwingend notwendig zu ermitteln, da sie weder in formgebenden noch fugenbildenden Bereichen

liegen und/oder darüber hinaus am Zusammenbau nicht mehr messbar sind oder keine (erkennbare) Relevanz für die Zusammenbaugenauigkeit haben (z.B. Lochmessung an Beplankung unten für Montage Nummernschild).

Das Ergebnis der bisher durchgeführten Schritte ist, dass ein Messkonzept mit einer geeigneten minimalen Anzahl von Messpunkten vorliegt, das im Sinne der Messtechnik geprüft und für die Weiterverwendung geeignet ist.

Statistische Vorschrift zur Repräsentation der jeweiligen Charge festlegen

Das grundlegende Ziel der Methodik zur objektivierten Robustheitssteigerung von fugenbildenden Anbauteilen im Karosseriebau ist es, die optimale Shimseinstellung für jede einzelne Einzelteilverpaarung als individuellen Zusammenbau zu ermitteln und umzusetzen. Dies bedeutet jedoch, alleine für das Beispiel des Heckdeckels, dass bei einer angenommenen zu produzierenden Stückzahl von 500 Heckdeckeln pro Tag, allein $500 \times 7 = 3500$ Bauteile pro Tag vermessen werden müssen. Durch die Vielzahl an unterschiedlichen Baureihen, die pro Standort produziert werden, ist die Anzahl der zu vermessenden Bauteile entsprechend noch viel größer. Dies ist weder zeitlich noch wirtschaftlich realisierbar. Den Grundlagen zufolge zeigt Neumann [NEU 13] auf, dass eine gleichbleibende Qualität des Abpressergebnisses je Messpunkt innerhalb einer Charge (= ähnlich kleine Standardabweichung je Messpunkt je Charge) durch gezieltes Nachregeln der Presswerkparameter erzeugt werden kann, der Mittelwert je Messpunkt je Charge jedoch deutlich schwankt (Abbildung 5.9). Dies bestätigt die chargenweisen Bauteilabweichungen trotz kleiner Streuung innerhalb einer Charge.

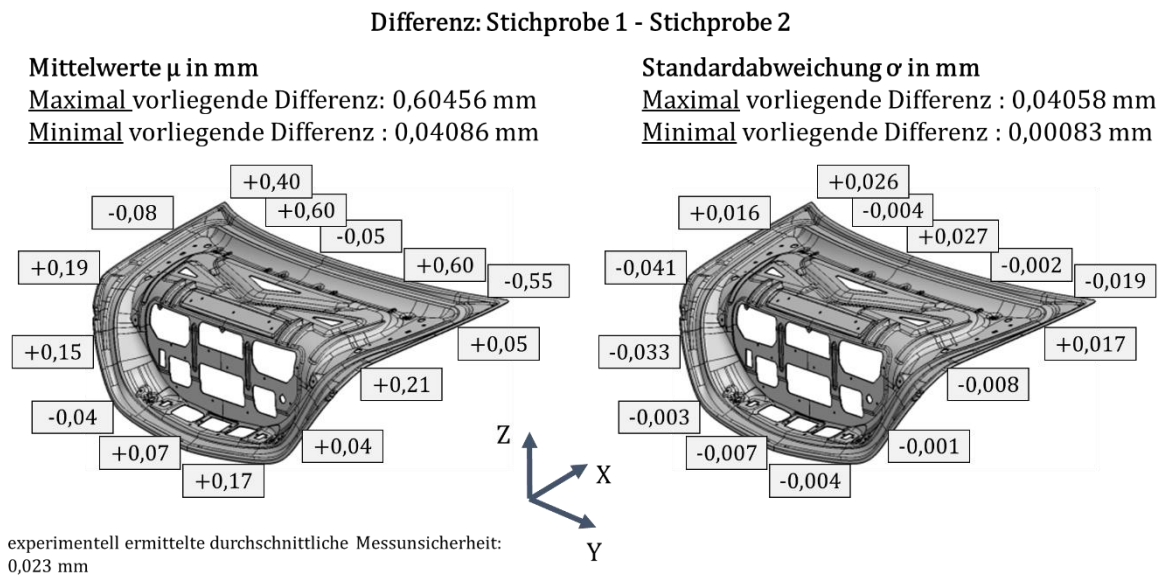


Abbildung 5.9: Schematische Darstellung der Mittelwertdifferenz zwischen zwei Beispielchargen exemplarisch für die Flansche am Innenteil der vorliegenden Heckdeckelfertigung, Werte in mm.

Dies ermöglicht es, die jeweilige Charge mittels eines repräsentativen Werts je Messpunkt zu beschreiben.

Für den idealen Fall

$$\sigma = 0 \quad (19)$$

ist die Messung eines Einzelteils je Charge je Einzelteiltyp ausreichend, um die optimalen Shimseinstellungen entsprechend für alle chargenidentischen Einzelkombinationen (Wörterklärung siehe Abbildung 5.11) geltend ermitteln zu können. Die maximale Anzahl an Zusammenbauten einer chargenidentischen Kombination variiert und definiert sich jeweils über den Einzelteiltyp mit der geringsten durchschnittlichen Chargengröße.

Für den häufigen Fall im Karosseriebau, dass die Standardabweichung ungleich Null aber klein und weitestgehend innerhalb der Toleranzvorgaben liegt (anderenfalls ist zunächst das Prozesspotenzial zu überprüfen, siehe unten und vgl. Kapitel 3.2)

$$0 \leftarrow \sigma \pm \Delta\sigma \ll TB, \text{ bzw. } c_p \gg 1 \quad (20)$$

wird verwendet, dass als geeigneter Repräsentant der gesamten Charge der Mittelwert der Charge je Messpunkt angesehen werden kann. Wie in den Grundlagen beschrieben (vgl. Kapitel 3.3) wird in den VDA-Richtlinien angegeben, dass die Verwendung von fünf verschiedenen Einzelteilen zur Mittelwertbildung ausreicht. Bei entsprechender Praxisbefragung gaben die Werker die Anzahl von drei Einzelteilen als zielführend aus Erfahrung an. Zunächst empfiehlt sich dennoch die Orientierung am standardisierten Vorgehen nach den VDA Richtlinien:

$$n_{\text{Mittelwert}} := 5 \quad (21)$$

Die spätere praktische Anwendung kann je nach Prozess zeigen, dass 4 oder 3 Bauteile ausreichen können, was den Messaufwand deutlich reduziert.

Für die Ermittlung der Standardabweichung reicht diese Stichprobengröße jedoch nicht aus [VDA 5]. Die Standardabweichung ist an das Vertrauensintervall nach Gleichung 13 gekoppelt. Falls die ermittelte Standardabweichung (der Stichprobe) kleiner ist als die wahre Standardabweichung (der Grundgesamtheit), so wird die Einzelteilqualität als besser angenommen werden als sie eigentlich ist – dies ist nach Bohn et al [BOH 12] kritisch. Bei weiteren Betrachtungen ist die Standardabweichung immer mit ihrem oberen Grenzwert des Vertrauensintervalls anzugeben [BOH 13], dementsprechend sollte der obere Grenzwert des Vertrauensintervalls deutlich kleiner sein als die Toleranzbreite des jeweiligen Merkmals. Der andere Fall, dass die ermittelte Standardabweichung größer ist als die wahre Standardabweichung, ist weniger kritisch, weil dann die wahre Standardabweichung näher an Null liegt und damit sogar besser ist (vgl. Gleichung 20). Daraus ergibt sich, dass die obere Grenze des Vertrauensintervalls der Standardabweichung innerhalb des Toleranzintervalls liegen muss. Entsprechend muss die Standardabweichung nicht

explizit aus den experimentell ermittelten Messdaten berechnet werden. Um den Aufwand hierfür minimal zu halten eignet sich entsprechend Abbildung 3.4 ein iteratives Vorgehen, da so bereits schnell klar ist, in welchem Bereich die Standardabweichung zu erwarten ist. Ist die zu messende Standardabweichung des Herstellungsprozesses groß gegenüber den Toleranzgrenzen lässt sich dies bereits mit wenigen Bauteilen abschätzen. Fehlerabweichungen von über 100 % bei der Wahl von sehr kleinen n können jedoch generell ungeeignet sein eine Aussage zu treffen – auf der anderen Seite kann eine Stichprobengröße von $n = 150$ die notwendigen Genauigkeit übersteigen und es wird ein erheblicher, nicht gerechtfertigter Messaufwand betrieben. Eine in der Praxis gängige Zielgröße bzgl. Aufwand-Nutzen-Verhältnis (Fehler nach Gleichung 14 bei etwa 20%) ist:

$$n_{\text{Standardabweichung}} := 40 \quad (22)$$

Je nach Anwendungsfall ist diese Stichprobe aber entsprechend anzupassen. Ergibt sich, dass die Standardabweichung einer Charge nicht kleiner als das Toleranzband ist (vgl. unten: Prozesspotenzial der Einzelteilmontage), so ist die Bedingung in Gleichung 20 nicht erfüllt: dies ist jedoch eine notwendige Bedingung um die Charge durch eine repräsentative Stichprobe $n_{\text{Mittelwert}}$ im Sinne dieser Methode zu charakterisieren. Liegt eine dementsprechend schlechte Einzelteilqualität vor, wird an dieser Stelle die Fortführung der Methode nicht empfohlen. Stattdessen ist zunächst eine Optimierung des Presswerkprozesses anzustreben, da so eine Einhaltung der Zusammenbaumaßhaltigkeiten generell schwierig ist.

Prozesspotenzial der Einzelteilmontage für gewählte Messpunkte prüfen

Für diesen angesprochenen Fall, dass mit der vorliegenden Einzelteilqualität obige Bedingung nicht erfüllt werden kann (Gleichung 20), ist entsprechend gemäß Kapitel 3.2 eine Überprüfung der Prozesskennwerte des vorliegenden Herstellungsprozesses der Einzelteile durchzuführen. Eine Prüfung des Prozesspotenzials über den gesamten Anlagenzyklus ist in vielen Fällen, so auch im vorliegenden Fall, im Voraus nicht möglich und/oder mit erheblichem Arbeitsaufwand (Stichprobengröße, s.o.) verbunden, da es darüber hinaus zwingend notwendig ist verschiedene Chargen in die Stichprobe mit einzubeziehen um eine möglichst große Bandbreite über die Mittelwerte abzudecken. Damit das Prozesspotenzial über den Lebenszyklus jedoch erfüllt ist, ist ein erstes und notwendiges Kriterium, dass das Prozesspotenzial bereits für eine Charge erfüllt ist. Es sollte daher dies zumindest für eine Charge der Einzelteilmontage nachgewiesen werden, da es nach Kapitel 3.2 in der Massenproduktion wichtig ist, die Qualität des IST-Zustandes eines Prozesses zu kennen und dementsprechend zu handeln.

Anwendung:

Bei den ausgewählten Messpunkten der sieben Einzelteilmontagen der vorliegenden Heckdeckelfertigung erfüllen in der Beispielcharge³⁴ insgesamt 173 von 195 Messpunkten (89%)

³⁴ Im vorliegenden Fall wurde aus Messkapazitätsgründen mit $n_{\text{Standardabweichung}} = 30$ gearbeitet, was einem geringfügig höherem Fehler von $\hat{\sigma}_{sn} \frac{\sigma}{\sigma_{sn}} (30; 5\%) = 22,8\%$ entspricht.

die notwendige Bedingung, dass die Standardabweichung (σ) klein gegenüber der Toleranzbreite (TB) (vgl. Gleichung 20) ist - oder entsprechend ein notwendiges Prozesspotenzial von $c_p \geq 1$ (vgl. Kapitel 3.2 und Gleichung 10) erfüllt ist. Abbildung 5.10 zeigt exemplarisch die Verteilung der vorliegenden Prozesspotenziale am Beispiel des Innenteils der ausgewählten Heckdeckelfertigung. An diesem Einzelteiltyp liegt im vorliegenden Fall keinmal ein Prozesspotenzial von $c_p < 1$ vor. Die Verteilung zeigt deutlich, dass die 6-fache Standardabweichung einer Charge um einiges geringer ist als das vorgegebene Toleranzband. Dieser „Puffer“ wird dazu benötigt Mittelwertabweichungen verschiedener Chargen zueinander zu kompensieren. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Standardabweichung generell klein ist. Nach Neumann [NEU 13] ist die Standardabweichung für Einzelteile aus dem Presswerk damit für alle kommenden Chargen auch in dieser Größenordnung³⁵. Das Prozesspotenzial der Einzelteilmontage im vorliegenden Fall ist damit als geeignet befunden.

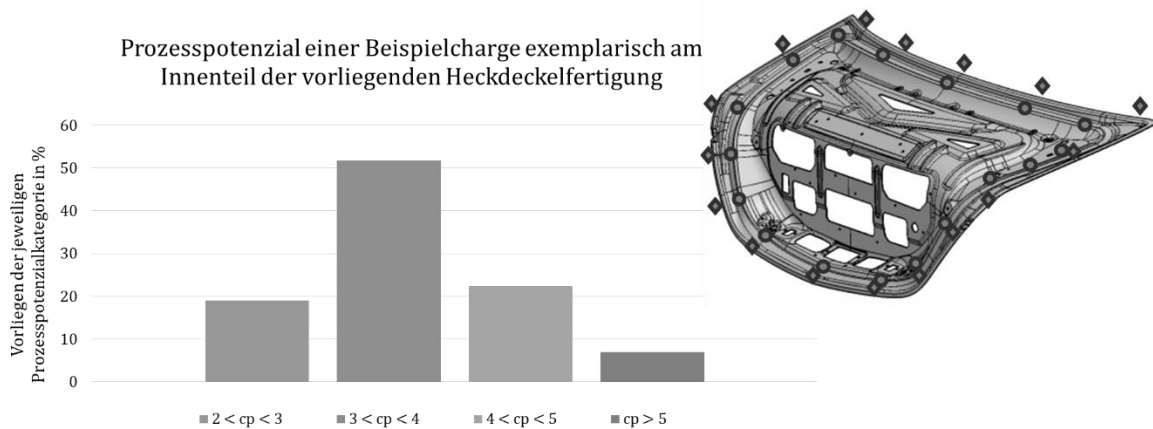


Abbildung 5.10: Darstellung der vorliegenden Prozesspotenziale c_p (siehe Gleichung 10) exemplarisch für die 58 Messpunkte am Innenteil einer Beispielcharge der vorliegenden Heckdeckelfertigung.

5.1.2 Definition Stationszeitprognose

Für die Stationszeitprognose ist das Ergebnis des vorangegangenen Kapitels essentiell. Der Fokus geht vom Einzelteil als Individuum zur Charge als Individuum. Das Ziel einer Stationszeitprognose ist daher die Vorhersage eines an der Fertigungsanlage bevorstehenden Chargenwechsels des jeweiligen Einzelteiltyps, um den daraus resultierenden Wechselzeitpunkt der vorliegenden Bauteilabweichungen zu definieren. Im Rahmen der hier entwickelten Methode wird die Stationszeitprognose an mehreren Stellen benötigt:

- Kenntnis über die jeweiligen Chargenkombinationen der Einzelteiltypen an der Anlage (Vorbereitungsphase)
- Kenntnis über die jeweiligen Chargenkombinationen der Einzelteiltypen an der Anlage (Regelungszyklus)

³⁵ Voraussetzung: gezieltes Nachregeln der Presswerkparameter zum Beispiel nach [Neu 13].

- Messmaschinenplanung (Vorbereitungsphase & Regelungszyklus)
- Personalplanung (Vorbereitungsphase & Regelungszyklus)

Für die zielgerichtete Erstellung von Trainingsdatensätzen fürs neuronale Netz aber auch für die spätere Speisung des neuronalen Netzes mit produktionsbegleitenden Daten ist es unabdingbar Kenntnisse darüber zu haben, welche Charge des einen Einzelteiltyps mit welcher Charge des anderen Einzelteiltyps zu einem Zusammenbau verbaut wird (Abbildung 5.11), also welche chargenidentische Kombination wann und wie lange vorliegt. So lassen sich spätere Justageempfehlungen simulieren und zielgerichtet umsetzen.

Auch bei der Personalplanung kann die Stationszeitprognose unterstützend eingesetzt werden. Je genauer der Chargenwechselzeitpunkt bekannt ist, desto effizienter kann der Werker seine Schicht planen und zum Wechselzeitpunkt sich an der Anlage einfinden, die Anlage stoppen, justieren und wieder freigeben.

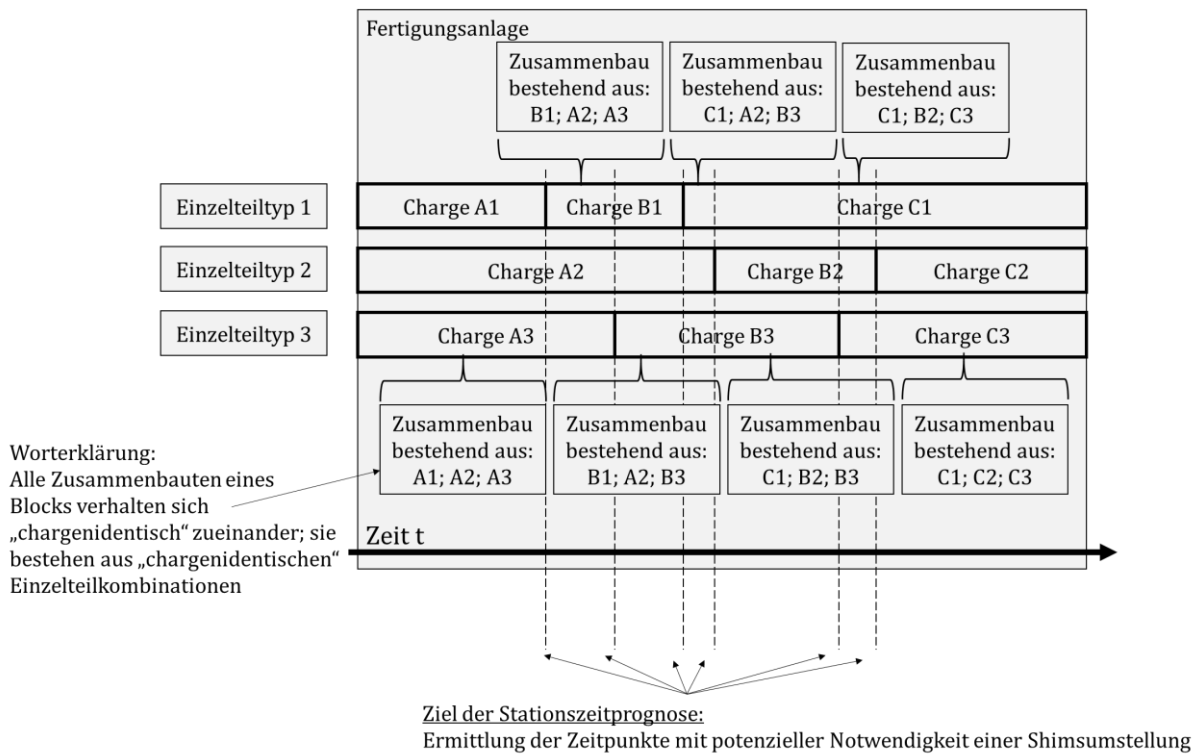


Abbildung 5.11: Schematische Darstellung von möglichen Chargenkombinationen am Beispiel eines Zusammenbaus bestehend aus drei verschiedenen Einzelteiltypen.

Für die Messmaschinenplanung ist es sinnvoll zu wissen, wieviel Zeit zwischen Eintreffen der Charge im Hochregallager und dem Lossenden zur Fertigungsanlage zur Verfügung steht, um die Charge des jeweiligen Einzelteiltyps messtechnisch zu erfassen. Innerhalb dieses Zeitraums ist freie Kapazität an der Messmaschine zu reservieren.

Insgesamt lassen sich hieraus zwei zentrale Fragen generieren:

1. In welchem Zeitraum ist Charge X im Hochregallager für die Messungen verfügbar?
2. Wann trifft Charge X in der Fertigungsanlage ein und wird verbaut?

Abbildung 5.12 veranschaulicht exemplarisch den Informations- und Bauteilfluss zur Beantwortung der zentralen Fragen der Stationszeitprognose am Beispiel der vorliegenden Heckdeckelfertigung. Vom Hochregallager zur Heckdeckelanlage herrscht für den Transport der Einzelteile das Pull-Prinzip³⁶. Die Heckdeckelanlage registriert die Anzahl der abgefragten Ladungsträger mit Bauteilen und meldet automatisch im Hochregallager, nach Abarbeitung einer vordefinierten Menge, wieder Bedarf an. Im Hochregallager wird verbreitet das First-In-First-Out Prinzip (FIFO) angewandt. Sinkt der Bestand im Hochregallager einer Einzelteilart unter einen kritischen Wert, wird ein Auftrag ans Presswerk übermittelt.

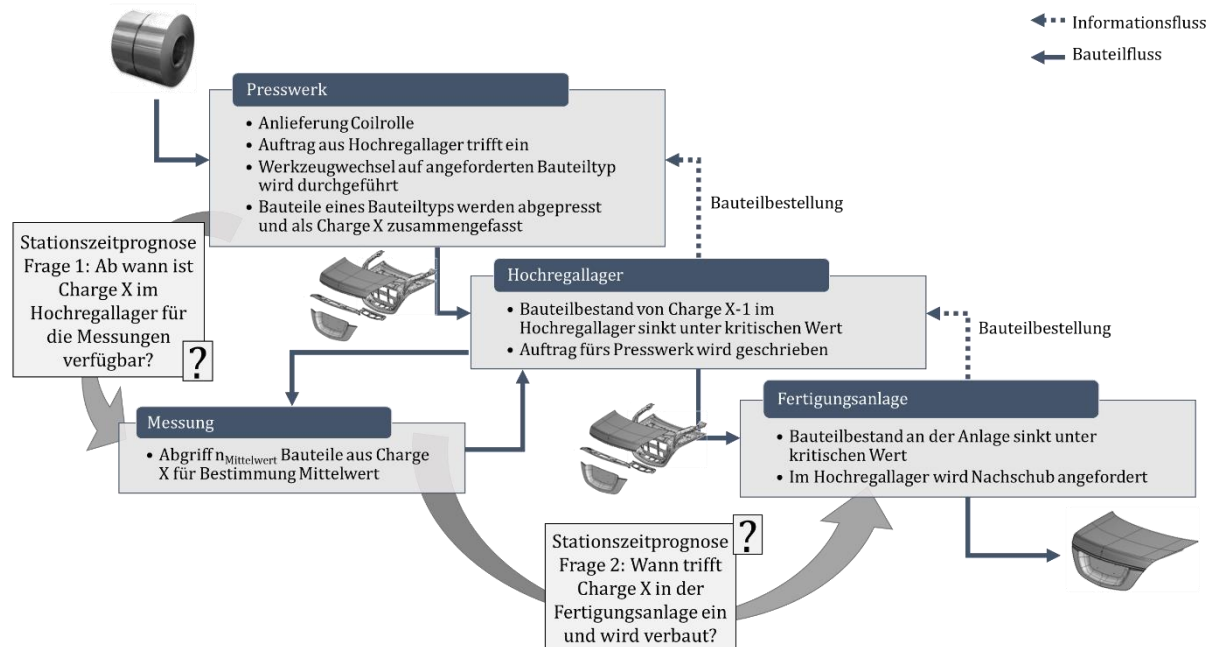


Abbildung 5.12: Schematische Darstellung des Informations- und Bauteilflusses zur Erstellung einer Stationszeitprognose am Beispiel der vorliegenden Heckdeckelfertigung.

Für die Berechnung des Chargenwechselzeitpunkts einer Charge X (Beantwortung Frage 2) bedarf es der Ermittlung verschiedener anlagen- und chargenspezifischer Kennwerte:

- $N_{\text{Chargengröße}_X}$: Anzahl/Stückzahl der Einzelteile eines Einzelteiltyps, die im Presswerk innerhalb eines Abpressauftrags gefertigt werden,

³⁶ Transport der Einzelteile zur Anlage geschieht nur auf Anfrage der Anlage. Kann die Anlage nicht weiter produzieren, werden keine Bauteile angefordert. Damit wird unnötige Lagerhaltung an der Anlage vermieden.

- $N_{\text{Tagesabrufe}}(t)$: Anzahl der am jeweiligen Tag definierten Tagessollmenge der Produktion, bzw. der dafür angeforderten/abgerufenen Einzelteile aus dem Hochregallager,
- $t_{\text{Reichweite}_X}$: zeitliche Reichweite der jeweiligen Charge; Zeit vom Verbau des ersten Bauteils bis zum Verbau des letzten Bauteils der jeweiligen Charge.

Im Folgenden wird das chargenweise Vorgehen zur Bestimmung der Kennwerte vorgestellt. Bei den folgenden Schritten ist zu beachten, dass diese nicht nur einmalig durchgeführt werden, sondern individuell und erneut für alle aufkommenden Chargen. Insgesamt lässt sich aber feststellen, dass sich die Chargengröße je Einzelteiltyp im laufenden Fertigungsprozess von Charge zu Charge nur um wenige Bauteile unterscheidet. Um jedoch Fehlerfortpflanzung zu vermeiden, gilt es die Kennwerte regelmäßig am besten für jede Charge erneut zu prüfen und gegenzurechnen.

Bestimmung der jeweiligen Chargengröße $N_{\text{Chargengröße}_X}$

Die Chargengröße $N_{\text{Chargengröße}_X}$ wird beim Einpflegen des Auftrags im Presswerk festgesetzt, und ist zumeist über eine Datenbank leicht auslesbar. Die Chargengröße ist einzelteiltypspezifisch und variiert von Charge zu Charge. Die Chargengröße hängt immer ab von:

- Bestellstatus Coils
- Lagerbestand Coils
- Auslastung Presswerk

Über die Taktzeit des Presswerks lässt sich der Zeitpunkt des Eintreffens im Hochregallager leicht ermitteln (Beantwortung Frage 1). Geringfügige Abweichungen zwischen der bestellten Menge und der gelieferten Menge sind z.B. durch Ausschuss vertretbar.

Bestimmung der anlagenspezifischen Tagesabrufe $N_{\text{Tagesabrufe}}(t)$

Die Tagesabrufe $N_{\text{Tagesabrufe}}(t)$ sind sowohl anlagen- als auch tagesspezifisch. Die Einflüsse lassen sich in bekannte, vorhersagbare und unvorhersehbare Faktoren unterteilen:

Bekannte Faktoren (fließen jedoch nicht direkt in $N_{\text{Tagesabrufe}}(t)$ ein, sondern in $t_{\text{Reichweite}_X}$ ein, siehe unten):

- Wartungsschichten,
- Ausfallschichten, wie Wochenende und Feiertage

Vorhersagbare Faktoren der Veränderung von $N_{\text{Tagesabrufe}}(t)$:

- saisonales Kaufverhalten (z.B. weniger Cabrios im Winter)
- Urlaubsphasen (z.B. reduzierte Produktion im August)

Unvorhersagbare Faktoren der Veränderung von $M_{\text{Tagesabrufe}}(t)$:

- Maschinenstörungen
- Lieferausfälle beim Lieferant
- allgemeine Wirtschaftslage

Die genannten unvorhersagbaren Faktoren haben die Eigenschaft relativ plötzlich die Tagesabruftzahlen zu verändern, weswegen es unmöglich ist diese in eine Prognose mit einzubeziehen. Dadurch verursachtes stark volatiles Verhalten gilt es zunächst durch eine Mittelwertbildung pro Woche zu glätten, da es nicht repräsentativ über den Lebenszyklus einer Anlage besteht. Aber auch die Mittelung der Tagesabrufe je Woche zeigt ein volatiles Verhalten, welches stark geprägt von Urlaubsphasen (=Produktionsreduktion) ist, die zwar immer im selben Zeitraum, jedoch selten in genau derselben Woche jedes Jahr liegen. Abbildung 5.13 zeigt daraufhin die monatliche Mittelung der Tagesabrufe am Beispiel der vorliegenden Heckdeckelanlage. Hierin spiegeln sich die vorhersagbaren Faktoren wie Urlaubsphasen und das saisonale Kaufverhalten der Kunden wider, die sich wie auch in [MER 13] beschrieben jährlich wiederholen.

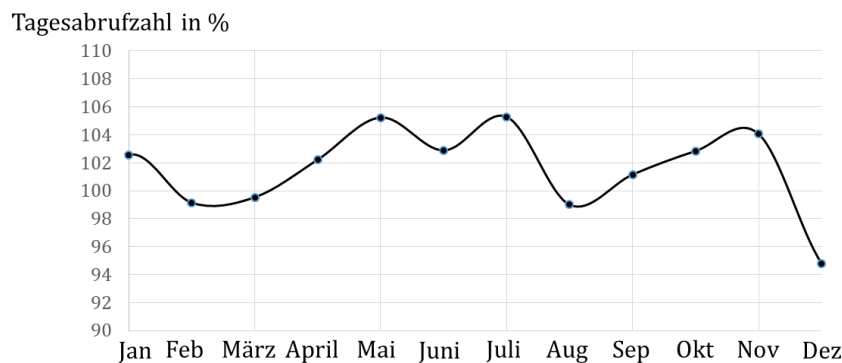


Abbildung 5.13: Darstellung der saisonalen Schwankung der Tagesabruftzahlen der vorliegenden Heckdeckelfertigung normiert auf das Jahresmittel.

Wird der gleitende Mittelwert (vgl. Kapitel 3.6) eingesetzt, um die Tagesabruftzahlen des jeweils nächsten Monats³⁷ zu prognostizieren, dann ergibt sich eine durchschnittliche Unsicherheit der prognostizierten Tagesabruftzahl im Beispieljahr von ungefähr $\sigma=5\%$. Bei einer Schichtdauer von 8 h entspricht dies einer durchschnittlichen Unsicherheit von 24 Minuten. Je genauer die Tagesabruftzahl angegeben werden kann, desto genauer lassen sich auch die Reichweite und der darauf basierende Chargenwechselzeitpunkt angeben (s.u.). Nach Mertens et al [MER 12] hängt aber die Forderung nach einer höheren Genauigkeit auch immer mit zusätzlichem Aufwand zusammen, wodurch es diesen eindeutig gegenüber des Nutzens einer besseren Prognose abzuwägen gilt. Eine Vorhersage des

³⁷ Glättung über 5 zurückliegende Monate: $\sigma = 5,07\%$; Glättung über 3 zurückliegende Monate: $\sigma = 4,62\%$.

Chargenwechselzeitpunkts auf 24 min genau erleichtert bereits viele Vorgänge der Werker (Annahme Idealfall ohne weitere Störeffekte). Bei einer 8 h-Schicht kann in diesem Fall ein Werker allein für 20 Chargenwechsel eingeteilt werden, sofern diese optimal zeitversetzt liegen. Dadurch, dass immer häufiger Werker nicht mehr nur für eine Anlage zuständig sind, sondern die Verantwortung für mehrere nebeneinander liegende Anlagen haben, bringt die Vorhersage eine entsprechende Planungssicherheit für den Arbeitstag.

Gerade aber die saisonalen Schwankungen, welche sich durch leicht volatiles Verhalten auszeichnen, kann ein gleitender Mittelwert schwer abbilden, was zwangsläufig zu einer größeren Unsicherheit in diesem Zeitraum führt. Hierzu wird der Saisonfaktor $S(t)$ eingeführt, der den monatlich gemittelten Abrufzahlen des jeweiligen vorangegangenen Jahres entspricht. Im Allgemeinen liegen entsprechende Werte bei vorhandenen Anlagen vor. Falls die betrachtete Anlage bzw. das zu produzierende Fahrzeug ein Neustart ist, liegen meist zumindest verwendbare Referenzdaten ähnlicher Fahrzeugprojekte vor. Wenn auch dies nicht der Fall ist, ist hierbei dann zwangsläufig auf unternehmerische Erfahrungswerte oder Zahlen aus marktstrategischen Analyse zurückzugreifen. Der Saisonfaktor deckt dann das saisonale Trendverhalten inklusive Volatilität der Abrufzahlen über das Jahr ab.

Darüber hinaus muss die Stationszeitprognose aber auch auf kurzfristige Änderungen bzw. auf systematische Abweichungen zum Vorjahr reagieren können. Hierzu wird der Saisonfaktor $S(t)$ mit dem relativen Korrekturfaktor K_t , angelehnt an die Idee des erweiterten multiplikativen Ansatzes des Winterverfahrens [WIN 60] von Archibald et al [ARC 03] bzgl. eines normierten Korrekturfaktors, hier jedoch auf Basis des gleitenden Mittelwerts (siehe oben), verbunden (Abbildung 5.14). Der gleitende Mittelwert soll sich dabei auf einen möglichst kurzen, zurückliegenden aber repräsentativen Zeitraum beziehen. Basierend auf der bereits durchgeführten monatlichen Mittelung der Werte und oben beschriebenen Ausführungen eignet es sich hier, drei vorangegangene Monate zur Glättung heranzuziehen. Das bedeutet, die Tagesabrufzahl $N_{\text{Tagesabrufe}}(t)$ ließe sich wie folgt prognostizieren:

$$N_{\text{Tagesabrufe}}(t) := S(t) * K_t \quad (23)$$

mit

$$K_t = \frac{1}{3} \sum_{\text{Letzte 3 Monate } (i)} \left[\frac{\text{Tagesabrufe Monat } i \text{ (dieses Jahr)}}{\text{Tagesabrufe Monat } i \text{ (vergangenes Jahr)}} \right] \quad (24)$$

Damit soll die ausschließliche Anwendung der linearen Glättung des gleitenden Mittelwerts verfeinert werden.

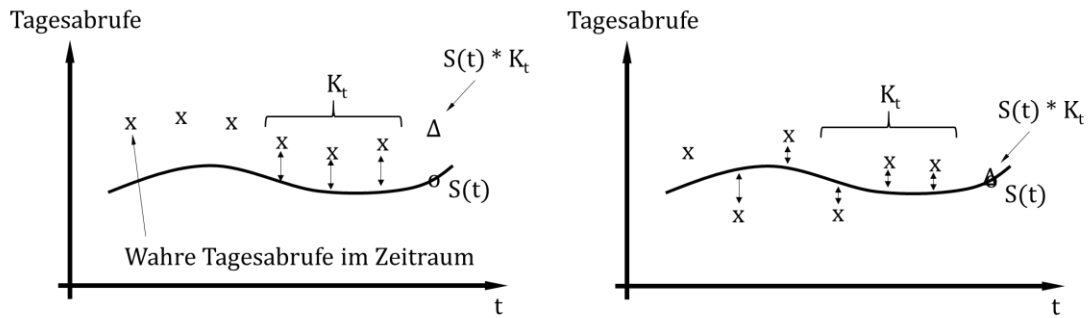


Abbildung 5.14: schematische Darstellung der Prognose der Tagesabrufe basierend auf dem absoluten Saisonfaktor $S(t)$ aus dem Vorjahr und dem relativen Korrekturfaktor K_t der vergangenen 3 Monate, dargestellt für zwei exemplarische Beispielfälle.

Bestimmung der jeweilig entsprechenden Chargenreichweite $t_{Reichweite}$

Die Chargenreichweite $t_{Reichweite_X}$ (Gleichung 25) definiert sich chargenspezifisch aus der jeweiligen Chargengröße $N_{Chargengröße_X}$, den prognostizierten Tagesabrufen $N_{Tagesabrufe}(t)$ gemittelt im Zeitraum der jeweiligen Charge X sowie der zeitlichen Summe der geplanten ausfallenden Schichten $t_{Schichtausfälle_X}$ im Zeitraum der jeweiligen Charge X zum Beispiel am Wochenende oder für Wartungsschichten:

$$t_{Reichweite_X} = (N_{Chargengröße_X} / \overline{N_{Tagesabrufe}}) + t_{Schichtausfälle_X} \quad (25)$$

Im vorliegenden Fall ergeben sich je nach Einzelteiltype Chargenreichweiten von 2-5 Tagen.

Bestimmung des jeweils bevorstehenden Chargenwechselzeitpunkts

Auf Basis der prognostizierten Chargenreichweite $t_{Reichweite_X-1}$ der laufenden Charge X-1 und deren Einsatzzeitpunkt $t_{Verbau_Anf_X-1}$ lässt sich wie folgt das Chargenende $t_{Verbau_End_X-1}$, und somit der folgende Chargenwechselzeitpunkt $t_{Verbau_Anf_X}$ berechnen:

$$t_{Verbau_Anf_X} = t_{Verbau_End_X-1} = t_{Verbau_Anf_X-1} + t_{Reichweite_X-1} + t_{Störungen} \quad (26)$$

mit

$$t_{Verbau_Anf_X-1} = t_{Abfahrt_X-1} + \emptyset t_{Transport} + \emptyset t_{Puffer} \quad (27)$$

Der Einsatzzeitpunkt $t_{Verbau_Anf_X-1}$ der Charge X-1 basiert dabei auf dem Zeitpunkt, an dem die Charge das Hochregallager verlässt, kumuliert mit der durchschnittlichen Transportzeit $t_{Transport}$, die ein Ladungsträger vom Hochregallager bis zur Anlage benötigt und der durchschnittlichen Zeit t_{Puffer} , die ein Ladungsträger im Anlagenpuffer verbringt, bis das erste Bauteile zum Verbau entnommen wird. Dabei ist der letzte Zeitpunkt im Hochregallager oftmals in der Logistikdatenbank des Unternehmens auslesbar. Für die Bestimmung der durchschnittlich benötigten Transportzeit $t_{Transport}$ vom Hochregallager zur Anlage

und der durchschnittlichen Pufferzeit t_{Puffer} sind zwangsläufig Kenntnisse über den unternehmensspezifischen Logistikprozess notwendig. Je mehr digitale Scans im Prozess eingeführt sind, desto einfacher lässt sich dieser Schritt umsetzen. Insgesamt stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung um diese Zeiten ($t_{\text{Transport}}$, t_{Puffer}) zu ermitteln:

- Messen von Hand mit Stoppuhr mittels definierter Vorgehensweise nach [REFA 87]
- Verwenden von Erfahrungswerten (Interviews)
- Materialflusssimulation (digitalen Fabrik) [BRAC 11]

Im vorliegenden Fall ergibt sich für die durchschnittliche Transportzeit vom Hochregallager zur Anlage etwa 1 h. Die Pufferzeit an der Beispielanlage beträgt 3 h, dies entspricht dem „Worst-Case-Szenario“ der Beschaffungszeit von Bauteilen aus dem Hochregallager, falls das Transportsystem ausfällt, damit die Anlage trotzdem nicht zum Stillstand kommt.

Abbildung 5.15 visualisiert den Sachverhalt aus Gleichung 26. Dadurch, dass die Variable t_{Abfahr_X-1} immer genau eine Charge im Voraus bekannt ist, lassen sich zu diesem Zeitpunkt die Unsicherheiten der Prognose mit dem vorgestellten Verfahren minimieren. Werden die Prognosen als Wochen- bzw. Monatsplan bereits im Voraus erstellt, gilt es die Prognosen bei jedem auftretenden Chargenwechselzeitpunkt zu aktualisieren. Wird dies nicht durchgeführt muss sich vor Augen geführt werden, dass nach [PAP 16] die jeweiligen Unsicherheiten u (angegeben in Einheit der Zeit) der unabhängigen Faktoren quadriert addiert werden:

$$u_{\text{Vorhersage}_X}^2 = u_{\text{Verbau_Anf}_X-1}^2 + u_{\text{Reichweite}_X-1}^2 + u_{\text{Störungen}_X-1}^2 \quad (28)$$

Dabei ist zu beachten, dass sich wiederum die jeweiligen Unsicherheiten u pro Chargenvorhersage auch im Quadrat addieren (Gleichung 29), was eine Vorhersage über mehrere Chargen hinweg zweifelhaft macht. Dies bedeutet eine Vorhersage des Chargenwechselzeitpunkts mehr als eine Charge im Voraus sollte nur zur Erstellung des Wochenplans verwendet werden und ist für die spätere Justage jeweils entsprechend zu konkretisieren.

$$u_{\text{Vorhersage}_X+Y}^2 = u_{\text{Vorhersage}_X+(Y-1)}^2 + u_{\text{Vorhersage}_X+(Y-2)}^2 + \dots + u_{\text{Vorhersage}_X+(Y-Y)}^2 \quad (29)$$

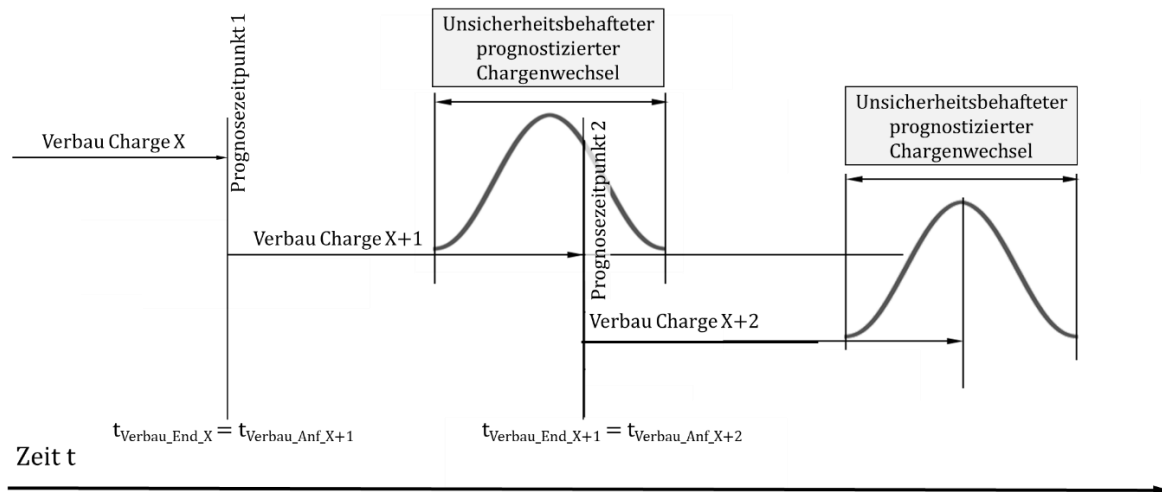


Abbildung 5.15: Schematische Darstellung der unsicherheitsbehafteten prognostizierten Chargenwechsel in Bezug auf den Verbrauch der jeweiligen Charge.

5.1.3 Trainingsdatensätze generieren

Analyse des abgegrenzten Prozesses auf relevante Shimseinstellungen

Karosseriebauanlagen sind oftmals über Jahre hinweg gewachsene Anlagen. Die Anlagen sind höchst komplex und beinhalten oftmals nicht nur die notwendigen Eigenschaften der laufenden Serie, sondern auch noch der Vorgängerserie aus der Übergangszeit oder gar von parallel in der Anlage zu fertigende Baugruppen. In den Konstruktionsdaten der Anlagen sind alle Spannelemente $N_{\text{Spannelemente}}$ und ihre Einstellmöglichkeiten $N_{\text{Shimseinstellmöglichkeiten}}$ verzeichnet, wovon bei weitem nicht alle eingesetzt werden:

$$N_{\text{Spannelemente}} \gg N_{\text{Spannelemente_relevant}} \quad (30)$$

sowie

$$N_{\text{Shimseinstellmöglichkeiten}} \gg N_{\text{Shimseinstellmöglichkeiten_relevant}} \quad (31)$$

Mittels Interviews mit Mitarbeitern in der Produktion lassen sich die real genutzten Shimseinstellungen $N_{\text{Shimseinstellmöglichkeiten_relevant}}$ identifizieren, hierbei gilt es folgende Leitfragen zu beantworten:

- Welche Spannelemente gibt es?
- Welche Spannelemente sind fix, welche variabel?
- Welche werden häufig verwendet, welche nie?
- Welche Einstellungen an den häufig verwendeten werden verwendet, welche nie?

Abbildung 5.16 zeigt beispielhaft die Ausführung der verschiedenen Justageeinstellmöglichkeiten $N_{\text{Shimseinstellmöglichkeit_je_Spannelement}}$ pro Spannelement. Jedes Spannelement weist eine individuelle obere Shimsgrenze oSg und einer untere Shimsgrenze uSg auf. Mittels

Unterlegscheiben (engl. Shim) können zwischen den Grenzen diskrete Einstellungen eingenommen werden. Im realen Fall werden jedoch nicht alle verfügbaren Shimseinstellungen verwendet, sodass

$$N_{\text{Shimseinstellmöglichkeit_je_Spannelement}} > N_{\text{Shimseinstellmöglichkeit_relevant_je_Spannelement}} \quad (32)$$

gilt. Dadurch kann es vorkommen, dass sich eine Shimsgrenze oSg zu oSg_{real} verschiebt (vgl. Abbildung 5.16).

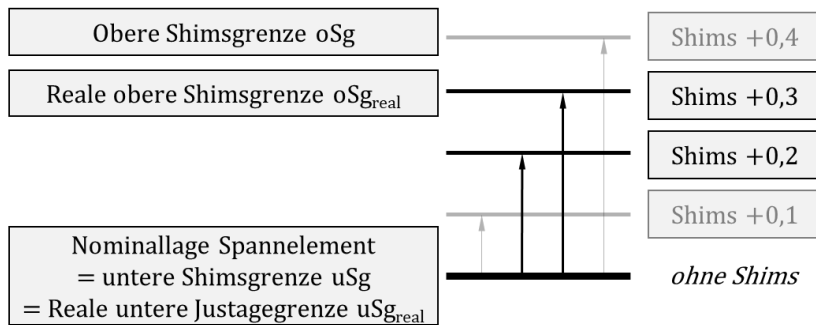


Abbildung 5.16: Schematische Darstellung eines exemplarischen Spannelements mit 5 verschiedenen Shimseinstellungen, wovon 2 Einstellungen im eingesetzten Fall nicht verwendet werden (ausgegraut)³⁸.

Im Fall der vorliegenden Heckdeckelfertigung gliedert sich der Herstellungsprozess in vier Teilschritte mit jeweils einer geometriefestlegenden Station (vgl. Abbildung 5.2). Jede Station umfasst eine gewisse Anzahl an Spannelementen (vgl. Tabelle 4), wobei nur ein Bruchteil davon real von den Werkern als Einstellmöglichkeit verwendet werden (vgl. Gleichung 30).

Tabelle 4: Übersicht der Anzahl der Spannelemente in der vorliegenden Heckdeckelanlage je Teilschritt

Fertigungsschritt (vgl. Abbildung 5.2)	$N_{\text{Spannelemente}}$
Unterezusammenbau Innenteil	78
Unterezusammenbau Beplankung (oben)	44
Unterezusammenbau Beplankung	68
Zusammenbau Heckdeckel	40

Reduzierung der genutzten Shimseinstellungskombinationen mittels DoE-Versuchsplan
 Auf Grund der sich aus der Anzahl der verbleibenden real genutzten Shimseinstellungen ergebenden hohen Zahl an Shimskombinationen $N_{\text{Shimskombinationen}}$ (Gleichung 33) ist es in

³⁸ Die Nominallage des Spannelements wird in der Anlaufphase, oftmals über mehrere Monate hinweg, iterativ festgelegt und innerhalb der geometriefestlegenden Station fixiert. In dieser vorgelagerten Phase sind entsprechend auch „negative“ Justageeinstellungen denkbar.

der Regel praktisch ausgeschlossen, für jede Kombination einen vollständigen Mess-/Versuchsplan durchzuführen.

$$N_{\text{Shimskombinationen}} = \prod_{i=1}^{N_{\text{Spannelemente_relevant}}} N_{\text{Shimseinstellmöglichkeit_relevant_je_Spannelement}}(i) \quad (33)$$

Durch Anwendung eines eingeschränkten Versuchsraums mittels der DoE-Methodik lassen sich die durchzuführenden Shimskombinationen $N_{\text{Shimskombinationen_nach_DoE}}$ gezielt reduzieren. Ein weitverbreitetes DoE-Verfahren ist das Latin-Hyper-Cube-Verfahren (vgl. Kapitel 3.5). Im Rahmen des DoEs muss eine Balance gefunden werden zwischen Reduzierung der Kombinationsmöglichkeiten und des entstehenden Messaufwands auf der einen Seite und entsprechender Datengenerierung als Trainingsgrundlage für das neuronale Netz auf der anderen Seite. Dies hängt vom jeweiligen Prozess und der Situation vor Ort ab. Sollten sich mittels des DoEs in der Praxis auch nicht zielführende Shimskombinationen ergeben, so sind diese Shimskombinationen manuell zu ersetzen. Im vorliegenden Fall könnte nicht zielführend bedeuten, dass zwei benachbarte Shimse gegenläufig eingestellt sind, was zu unerwünschtem Ausschuss im Zusammenbau führt. Hier ist es sinnvoll die Shimseinstellungen zu glätten, das bedeutet die Shimseinstellungen benachbarter Spannelemente aneinander anzupassen, um eine real einstellbarwürdige Shimskombination zu erhalten. Dies ist im vorliegenden Fall erlaubt, da der Fokus des Trainings eines neuronalen Netzes immer auf den später zu berechnenden Bereichen liegen sollte, im vorliegenden Fall also im Bereich von zielführenden Shimskombinationen und Zusammenbaumaßhaltigkeiten.

Im vorliegenden Fall liegen für das Beispiel der Heckdeckelfertigung keine umfassenden Ergebnisse für alle relevanten Shimseinstellungen vor, sondern nur eine Shimsumstellung im Rahmen der erhobenen Messreihen zu den zwei Beispielchargen zur prinzipiellen Demonstration der Machbarkeit der Methode.

Statistische Vorschrift zur Repräsentation der anzunehmenden Einzelteilabweichungen über mehrere Chargen/ den Lebenszyklus

Zur Erstellung der Trainingsdatensätze für das neuronale Netz ist es wichtig für alle Messpunkte je Einzelteiltyp das Spektrum seiner Messwerte exemplarisch abzubilden um dem neuronalen Netz die Möglichkeit zu geben das gesamte Messwertintervall in das Training mit einzubeziehen [KRI 07]. Aus Kapitel 5.1.1 ist bekannt, dass die Mittelwerte μ der Chargen streuen und somit ein Messwertintervall der Messpunkte über den Lebenszyklus der Anlage abbilden. Genau diese Streuung der Mittelwerte sollte entsprechend in den Daten repräsentiert sein – dies stellt ein zunächst unbekanntes Intervall dar. Je mehr Chargen einfließen, desto besser ist dieses Intervall abgedeckt, was wünschenswert ist. Um das Intervall angenähert repräsentieren zu können ist die Kenntnis einiger Grenzfälle hilfreich (Ausreißer nach oben und unten, sowie dazwischen), zumindest jedoch ein statistisch ausreichend ermittelter Mittelwert der Chargenmittelwerte. Entsprechend sollte gemäß Kapitel 5.1.1 mindestens

$$n_{\text{Chargen}} := 5 \quad (34)$$

Chargen pro Einzelteiltyp über den gesamten Versuchsplan in die Trainingsdatensatzgenerierung Eingang finden. Dieser Wert wird meist leicht erfüllt, da ein Chargenwechsel eines Einzelteils vergleichsweise häufig auftritt, um Lagerkosten von sehr großen Chargen zu vermeiden (Lean Production). Im vorliegenden Fall haben die Chargen eine Reichweite von maximal 5 Tagen. Das bedeutet, orientiert an dem Einzelteiltyp mit der größten Reichweite, ist die geforderte Chargenanzahl $n_{\text{Chargen}} = 5$ spätestens nach 17 Messtagen erfüllt. Die Intervalle der Bauteilabweichungen je Messpunkt sind dabei unabhängig von den einzustellenden Shimskombinationen (siehe oben) zu sehen. Sie hängen einzig von den Parametern der Herstellung im Presswerk ab, und kommen somit bereits aus dem vorgelagerten Schritt. Eine entsprechende Anzahl an Chargen pro Shimskombination ist daher nicht direkt notwendig zu berücksichtigen. Indirekt jedoch ist die Anzahl der chargenidentischen Einzelteilkombinationen pro Shimskombination konstant zu halten um das Netz bestmöglich trainieren zu können (vgl. Kapitel 3.1).

Planung der Messmaschinenbelegung (Einzelteil und Zusammenbau) & Erzeugung der Trainingsdatensätze

Durch Kombination des DoE-Versuchsraums mit der entwickelten Stationszeitprognose lässt sich die Messmaschinenbelegung zur Erstellung des Trainingsdatensatzes fürs neuronale Netz planen. Mittels dieses Trainingsdatensatzes wird sich das neuronale Netz sein „Wissen“ aneignen, dies bedeutet, dass hiervon maßgeblich die Genauigkeit des späteren Regelungszyklus abhängt. Da im Karosseriebau keine individuelle Kennzeichnung von Einzelteilen oder Zusammenbauten vorliegt, sind an dieser Stelle Hilfsmittel zur Identifizierung sinnvoll. Als weitverbreitete Möglichkeit ist hier die Beschriftung mit Wachsstiften zu nennen, diese wäscht sich im weiteren Produktionsprozess ab und hat so keinen Einfluss auf das produzierte Endprodukt. Die ausgeschleusten Einzelteile werden vor dem Messprozess eindeutig markiert und die aufgenommenen Messdaten entsprechend abgespeichert. Anschließend werden die vermessenen Einzelteile der Fertigungsanlage zugeführt. Am hinteren Ende der Anlage werden die Zusammenbauten ausgeschleust, die markierte Einzelteile enthalten. Sofern sich Pufferanlagen innerhalb der Fertigungsanlage befinden, sind diese im Vorfeld zu leeren, denn nur so kann sichergestellt werden, dass der ausgeschleuste Zusammenbau auch wirklich nur vermessene Einzelteile enthält. Die Messdaten vom Zusammenbau sind anschließend den jeweiligen Einzelteilmessungen zuzuordnen. Insgesamt gilt es mindestens $n_{\text{Mittelwert}}$ Einzelteile pro Einzelteiltyp und die dazugehörigen $n_{\text{Mittelwert}}$ Zusammenbauten auszuschleusen und zu vermessen (vgl. Kapitel 5.1.1, Gleichung 22). Hier entspricht also die Anzahl der durchzuführenden Versuche gerade der Anzahl der im DoE (Kapitel 5.1.3) ausgewählten Shimskombinationen $N_{\text{Shimskombinationen_nach_DoE}}$ multipliziert mit der Anzahl der pro Shimseinstellung vermessenen Bauteilen $n_{\text{Mittelwert}}$ je Einzelteilart:

$$N_{\text{Versuche}} = N_{\text{Shimskombinationen_nach_DoE}} * n_{\text{Mittelwert}} \quad (35)$$

Um die Bauteile je Versuchsdurchlauf gezielt einzuschleusen ist eine Taktzeitanalyse durchzuführen. Damit die vermessenen Einzelteile sich in einem gemeinsamen Zusammenbau wiederfinden, ist es oft notwendig, die Einzelteile gestaffelt in die Fertigungsanlage einzuschleusen (vgl. Abbildung 5.17). Damit ergibt sich auch die minimale Justagefrequenz zur Abarbeitung der DoE-Shimseinstellungen. Weiterhin ist aber auch die verfügbare Anzahl von Messmaschinen und die Dauer eines Messprogramms abhängig vom Einzelteiltyp bei der Planung der Durchführung miteinzubeziehen. Grundsätzlich lassen sich die Zusammenbaumessungen auch zeitlich aufschieben, sofern die Messmaschinen mit der Vermessung der Einzelteile ausgelastet sind. Essentiell dabei ist aber eine entsprechende Sortierung und Markierung der Zusammenbauten um die Messwerte später wieder zu verknüpfen. Beim Einschleusen der Einzelteile ist darauf zu achten, dass die Anlage „warmgefahren ist“ (vgl. Kapitel 2.1.1) damit ein repräsentativer Zustand in der Anlage herrscht und dieser in den Messdaten der Zusammenbauten widergespiegelt wird.

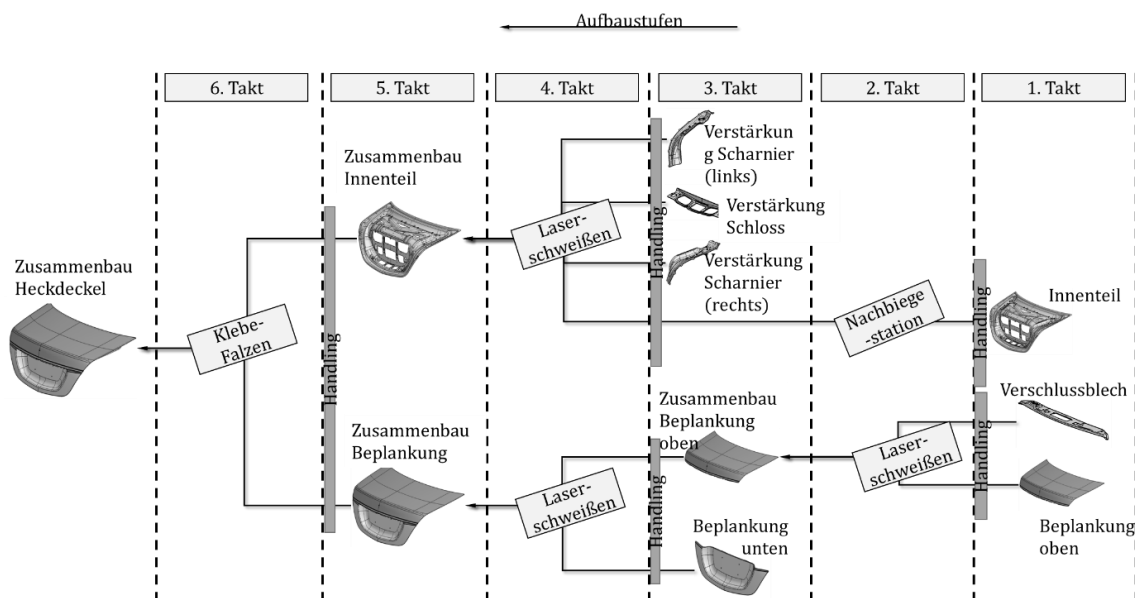


Abbildung 5.17: Schematische Darstellung eines Taktzeitplans am Beispiel der vorliegenden Heckdeckelfertigung; an den Handlingspunkten werden die Bauteile aus der vorherigen Station oder des Ladungsträgers entnommen, neu positioniert und in der folgenden Station abgelegt.

Abbildung 5.18 zeigt wie die Messwerte sinnvollerweise für eine leichte Integration in ein neuronales Netz zum Beispiel in einem Tabellenverarbeitungsprogramm (z.B. Excel) abzulegen sind. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Einzelteile zeilenweise passend zum dazugehörigen Zusammenbau aufgelistet werden³⁹.

³⁹ Eine spaltenweise Mittelwertbildung ist an dieser Stelle nicht zielführend, da sich dann nichtreale Messwertkombinationen bilden, die so zu ungeeigneten Shimseinstellungen bei Anwendung des neuronalen Netzes führen.

	Einzelteiltyp 1				Einzelteiltyp 2				...		Einzelteiltyp $N_{\text{Anzahl_Einzelteile}}$				Zusammenbau						
	Messpunkt 1 ₁	Messpunkt 2 ₁	...	Messpunkt n ₁ -1	Messpunkt n ₁	Messpunkt 1 ₂	Messpunkt 2 ₂	...	Messpunkt n ₂ -1	Messpunkt n ₂	Messpunkt 1 $N_{\text{Anzahl_Einzelteile}}$	Messpunkt 2 $N_{\text{Anzahl_Einzelteile}}$...	Messpunkt n $N_{\text{Anzahl_Einzelteile}}$ -1	Messpunkt n $N_{\text{Anzahl_Einzelteile}}$	Messpunkt 1 _{ZB}	Messpunkt 2 _{ZB}	...	Messpunkt n _{ZB} -1
Messung 1 aus A1, A2, A3 und Einstellung S2	Messwerte der ausgeschleusten Einzelteile																Messwerte der ausgeschleusten Zusammenbauten, die aus den vermessenen Einzelteilen hergestellt wurden				
...																					
Messung n _{Mittelwert} -1 aus A1, A2, A3 und Einstellung S2																					
Messung n _{Mittelwert} aus A1, A2, A3 und Einstellung S2																					

Abbildung 5.18: Mögliche tabellarische Messwertabspeicherung

Der benötigte Zeitaufwand für die Durchführung des DoEs ist stark anlagenspezifisch und hängt von den gegebenen Randbedingungen ab. Im vorliegenden Fall nimmt die Messzeit der Einzelteile den größten Anteil des zeitlichen Aufwands ein. Ein Durchlauf des Messprogramms für das Innenteil benötigt auf der taktilen Messmaschine exemplarisch mehr als eine Stunde. Das Durchschleusen der Einzelteile durch die Heckdeckelfertigungsanlage nimmt auf Grund der im Karosseriebau üblichen sehr kurzen Taktzeit am wenigsten Zeit in Anspruch.

5.1.4 Neuronales Netz generieren und trainieren

Neuronales Netz erzeugen und trainieren

Karosseriebauanlagen weisen hochkomplexe, voraussichtlich nichtlineare Wirkzusammenhänge auf, weshalb für das neuronale Netz zwei verdeckte Neuronenschichten gewählt werden (vgl. Kapitel 3.1). Als Lernalgorithmus wird die Resilient Backpropagation mit variablen Gewichten gewählt. Der Trainingsdatensatz wird aufgeteilt in Trainings- (70 %) und Testphase (30 %). Wichtig ist hierbei, dass alle Shimseinstellungen und Chargen (vgl. Kapitel 3.1) möglichst gleichmäßig in Trainings und Testdaten vorhanden sind, um jede Shimseinstellung und Charge auch entsprechend im Lernprozess des neuronalen Netzes zu repräsentieren, was ein optimales Training des neuronalen Netzes gewährleistet.

Abbildung 5.19 zeigt schematisch den benötigten Aufbau des neuronalen Netzes. Die Daten für die Eingangsschicht sind die jeweiligen Messdaten der Einzelteile und Zusammenbauten. Die Ausgabeschicht stellt die jeweiligen Shimseinstellungen dar.

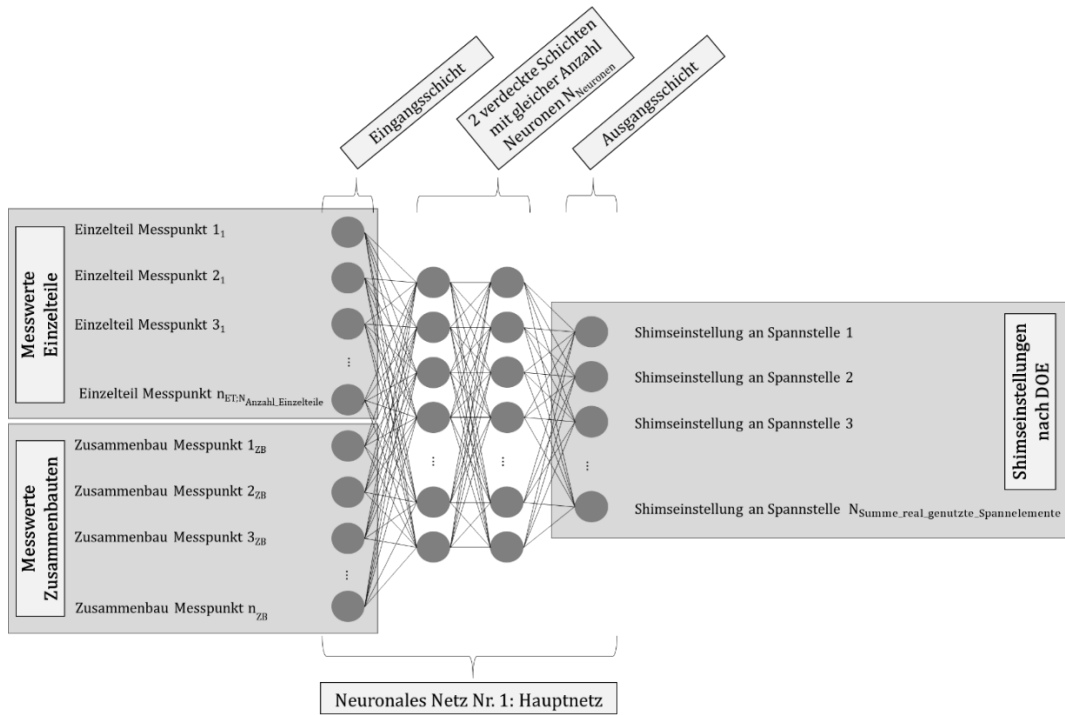


Abbildung 5.19: Schematische Darstellung des eingesetzten neuronalen Hauptnetzes in der Trainingsphase.

Mit dem BCA wird die Neuronenzahl M_{Neuronen} beider verdeckter Schichten simultan erhöht und das Netz jedes Mal erneut vollständig austrainiert, um die optimale Anzahl zu finden. Der BCA war erfolgreich, sobald er in der Testphase (Abbildung 5.20) ein Minimum des Netzwerkfehlers E_{SSE} ermittelt hat (vgl. Abbildung 3.3 links). Gemäß Kapitel 3.1 (Gleichung 5) wird die Fehlerfunktion E_{SSE} über die Summe der Versuche (Gleichung 35) und Ausgabeneuronen ermittelt. Die Anzahl der Ausgabeneuronen ist dabei entsprechend der Anzahl der real genutzten Spannelemente $N_{\text{Spannelemente_relevant}}$ in der betreffenden Anlage (vgl. Abbildung 5.19) zu wählen. Daraus ergibt sich der Netzwerkfehler im vorliegenden Fall:

$$E_{\text{SSE}} (N_{\text{Neuronen}}) = \frac{1}{2} * \sum_{i=1}^{N_{\text{Shimskombinationen_nach_DoE}} * n_{\text{Mittelwert}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{Summe_real_genutzte_Spannelemente}}} (o_{i,j} - y_{i,j})^2 \quad (36)$$

mit

$$o_{i,j} = f(x_{i,j}, \bar{w})$$

wobei

$f()$ = Abbildung neuronales Netz

$x_{i,j}$ = Messdaten an Einzelteil und Zusammenbau

$y_{i,j}$ = wahre Shimseinstellung der Shimskombination nach DoE

$o_{i,j}$ = propagierte Shimseinstellung des neuronalen Netzes

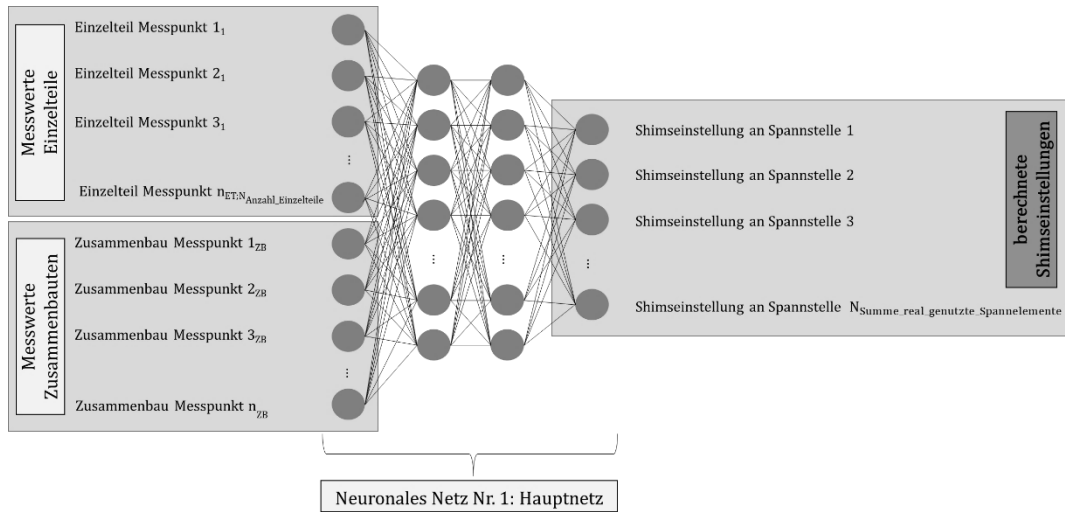


Abbildung 5.20: Schematische Darstellung des eingesetzten neuronalen Netzes in der Testphase; das Netz berechnet erstmalig die Shimseinstellungen $o_{i,j}$, die dann mit den dazugehörigen Shimseinstellungen $y_{i,j}$ nach DoE verglichen werden um den Netzwerkfehler E_{SSE} zu erhalten.

Ob das Training des Netzes auch erfolgreich für die gegebene Anwendung ist, lässt sich mit

$$e_{SSE} := \sqrt{\frac{2 E_{SSE} (N_{\text{Neuronen}})}{N_{\text{Shimskombinationen_nach_DoE}} * n_{\text{Mittelwert}} * N_{\text{Summe_real_genutzte_Spannelemente}}}} \quad (37)$$

als ungefähre Richtlinie bestimmen. e_{SSE} definiert die durchschnittliche absolute Abweichung pro Datensatz und Messpunkt in Millimeter. Dieser Wert sollte in der Größenordnung der durchschnittlichen Prozesswiederholgenauigkeit PWG der Messungen oder gar kleiner sein, also

$$e_{SSE} \lesssim \emptyset PWG \quad (38)$$

Im vorliegenden Fall liegt $\emptyset PWG$ bei 0,03 mm (vgl. Kapitel 5.1.1).

Falls kein Minimum für den Netzwerkfehler E_{SSE} für die Testdaten gefunden werden kann oder $e_{SSE} \gg \emptyset PWG$ ist, so war das Training nicht erfolgreich, weil vielleicht der Trainingsdatensatz nicht umfangreich genug ist. In diesem Fall sollte das DoE erweitert werden (siehe Kapitel 5.1.3). Möglicherweise können aber auch keine Verbindungen in den Daten gefunden werden, weil keine vorhanden sind. In diesem Fall sollten grundlegende Eigenschaften der Korrelation zwischen Eingabe und Ausgabe (manuell) überprüft werden (vgl. Kapitel 5.1.3). Selbstverständlich kann bei unkorrelierten oder zufälligen Daten kein Netz trainiert und keine sinnvolle Abbildung gefunden werden.

Sofern durch Anwendung des BCAs eine Neuronenzahl N_{Neuronen} gefunden ist und für $E_{\text{SSE}}(N_{\text{Neuronen}})$ der Testdatensätze ein Minimum existiert, ist die Trainings- und Testphase abgeschlossen. Darauffolgend soll ein neues Netz mit der ermittelten Neuronenzahl N_{Neuronen} trainiert werden, das nicht nur den Trainingsdatensatz (70 %) gelernt hat sondern den gesamten Datensatz (100 %) zum Lernen zur Verfügung gestellt bekommt. Dies gewährleistet, dass alle Messungen der Vorbereitungsphase auch in das Wissen des neuronalen Netzes mit eingehen, was das Aufwand-Nutzen-Verhältnis des DoEs optimiert. Im mathematischen Sinne wird das Training mit 100 % statt 70 % der Daten ein generell mindestens so qualitativ hochwertig trainiertes Netz wie das vorherige ergeben. Dieses Netz ist daher im Folgenden für den Regelkreislauf zu verwenden.

Plausibilisierung der Justageempfehlung des neuronalen Netzes

Das erstellte Netz ist anschließend einer Plausibilisierung analog Abbildung 5.21 zu unterziehen.

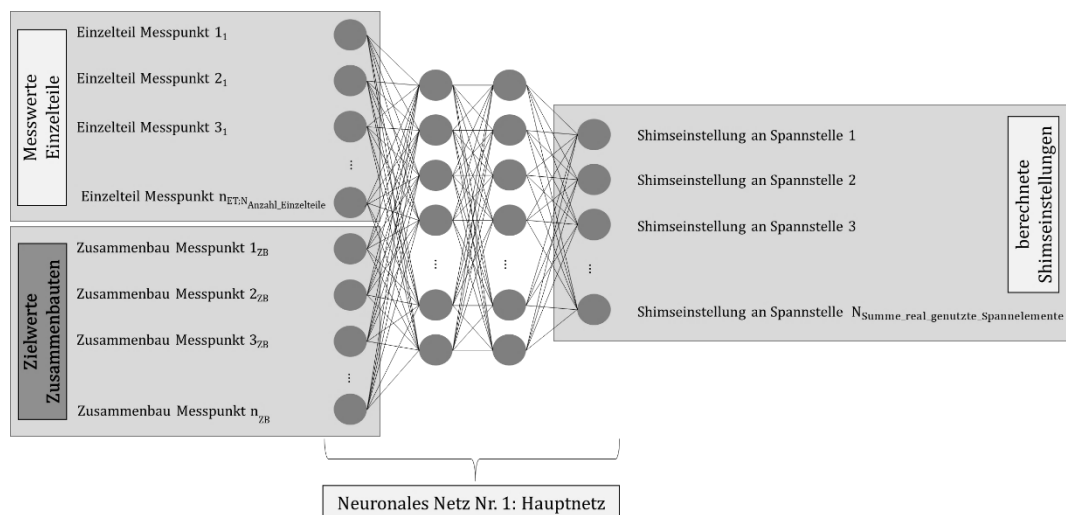


Abbildung 5.21: Schematische Darstellung des eingesetzten neuronalen Netzes in der ersten Anwendungsphase zur Prüfung der Robustheit der berechneten Shimseinstellungen.

Zur Plausibilisierung eignen sich die Einzelteilmessdaten aus dem Trainingsdatensatz. Die Eingabeschicht wird, wie gehabt, mit Einzelteilmesswerten der chargenidentischen Kombinationen befüllt. Die Werte der Zusammenbauten entsprechen diesmal aber nicht den Messwerten sondern den gewünschten Zielwerten. Die Zielwerte lassen sich aus den entwicklungsseitig festgelegten Toleranzwerten ableiten. Jede Fläche im Zusammenbau besitzt entsprechend seines Lastenheftes sowohl eine obere und untere Toleranzgrenze als auch einen Mittenwert mittig zwischen den Toleranzgrenzen. Abbildung 5.22 zeigt exemplarisch den Unterschied zwischen symmetrischer und einseitiger Toleranzvorgabe. Der Zielwert am entsprechenden Messpunkt entspricht dem Mittenwert. Dieser ist bei der symmetrischen Toleranzvorgabe immer entsprechend der Konstruktionslage – also Null.

Bei einer einseitig verschobenen Toleranzvorgabe ist der Zielwert entsprechen den Toleranzgrenzen zu verschieben.

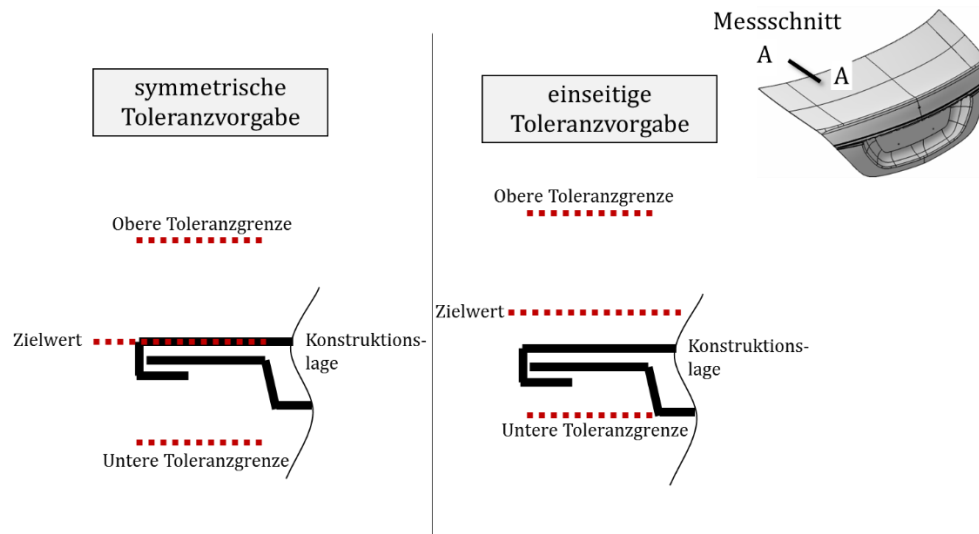


Abbildung 5.22: Darstellung der unterschiedlichen Zielwertfestlegung bei symmetrischen und einseitigen Toleranzvorgaben.

Die auf dieser Basis vom neuronalen Netz berechneten Shimseinstellungen entsprechen nun dem berechneten Shimsoptimum für diese chargenidentische Einzelteilkombination. Da die Shimse auf Grund des Repäsentantenverfahrens (vgl. Kapitel 5.1.1) pro chargenidentische Einzelteilkombination eingestellt werden, gilt es die berechneten Shimseinstellungen pro chargenidentische Einzelteilkombination zunächst zu mitteln⁴⁰. Die Streuung der Shimseinstellungen um ihren Mittelwert darf nicht zu groß ausfallen: Entsprechend Abbildung 2.8 darf die Standardabweichung nicht größer als der sechsfache durchschnittliche Abstand zwischen den diskreten Shimseinstellmöglichkeiten ausfallen. Falls die Abweichung wider Erwarten prozentual doch deutlich höher ist, sind vermutlich Durchführungsfehler in den vorangegangenen Schritten geschehen. Dies könnte sein:

- Die Streuungen der Bauteilabweichungen innerhalb der Chargen sind doch noch zur Repräsentantenfindung zu groß, entgegen der Prüfung aus Kapitel 5.1.1.
- Das Training des neuronalen Netzes war nicht erfolgreich ($E_{SSE}(N_{\text{Neuronen}})$ ergab kein Minimum in der Testphase), vermutlich auf Grund von mangelnder Datenmenge oder Ermangelung von Mustern im vorliegenden Prozess.
- Die Zielwerteinstellungen sind unrealistisch gewählt, also weitab von den realen Messergebnissen aus den Trainingsdaten. Die Frage ist also, inwieweit die Anlage die Zielwerte überhaupt liefern kann oder inwieweit das DoE (vgl. Kapitel 5.1.3) diese unzureichend abgebildet hat.

⁴⁰ Nicht geeignet ist es, die Einzelteil-Messwerte anders herum zuerst zu Mitteln und dann durch das Netz zu propagieren, denn dann werden nichtreale Messwerte, also für das Netz wohlmöglich unbekannte Messwertkombinationen, verwendet, was zu ungeeigneten Shimseinstellungen führen kann.

Ist die Streuung nachweislich klein, muss der gemittelte Shimswert je Spannelement mit den real möglichen Shimseinstellungen am jeweiligen Spannelement verglichen und diesbezüglich angepasst (gerundet) werden. Auf Grund der Wahl des Trainingsdatensatzes und der damit einhergehenden Bereiche in denen das neuronale Netz trainiert wurde, liegen die empfohlenen Shimseinstellungen auch im Bereich zwischen der oberen und unteren möglichen Shimseinstellung (vgl. Abbildung 5.16).

Prognose der Zusammenbaumaßhaltigkeiten unter Anwendung des neuronalen Netzes (optional)

Mit dem folgenden Schritt soll prognostiziert werden, welche Zusammenbaumaßhaltigkeiten von der Anlage theoretisch zu erwarten sind, wenn die vom neuronalen Netz vorgeschlagenen Shimseinstellungen verwendet werden. Dieser Schritt ist zum Abschließen der Vorbereitungsphase nicht zwingend notwendig. Nur bei drastischen Abweichungen der hier berechneten Prognose wird vor einer Anwendung der Methodik im Regelungszyklus gewarnt – dies ist jedoch bei gründlicher Abarbeitung der entwickelten Vorbereitungsphase nicht zu erwarten.

Ziel der Objektivierung und Optimierung der Qualitätskontrolle im Karosseriebau für fugenbildende Anbauteile mittels künstlicher neuronaler Netze ist es die Maßhaltigkeit der Zusammenbauten zu verbessern, sodass ein gleichmäßigeres Flottenergebnis (vgl. Gleichung 39) erzeugt wird (Abbildung 5.23).

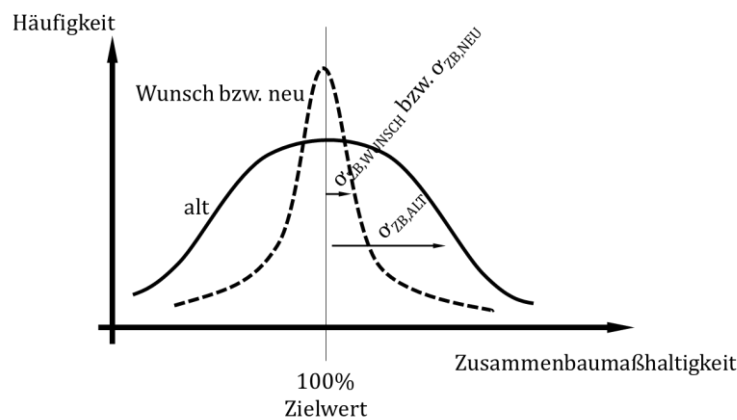


Abbildung 5.23: schematische Darstellung der gewünschten Verbesserung der Zusammenbaumaßhaltigkeit, normiert auf den jeweiligen Zielwert des jeweiligen Messpunkts.

Wenn also

$$\sigma_{ZB,ALT} > \sigma_{ZB,NEU} \quad (39)$$

gilt, dann bedeutet dies, dass eine Verbesserung der Zusammenbaumaßhaltigkeiten gegenüber den bisherigen Resultaten der Anlage vorliegt. Mittels des folgenden Exkurses

lässt sich diese Aussage bereits vor tatsächlicher Anwendung der vorgestellten Methode theoretisch prognostizieren.

Analog der bereits hergeleiteten Netzkriterien (vgl. oben und Kapitel 3.1) wird ein neues neuronales Netz erzeugt und nach dem BCA trainiert. Für die Trainingsphase stehen weiterhin die chargenidentisch sortierten Einzelteilmessdaten zur Anwendung bereit (Abbildung 5.24). Darüber hinaus fließen die im vorherigen Schritt (Neuronales Hauptnetz Nr. 1 – vgl. Abbildung 5.21) berechneten⁴¹ dazugehörigen Shimseinstellungen als Eingangsdaten in das Training mit ein. Die Ausgangsbeschicht hält für die Trainingsphase die jeweiligen Zielwerte am Zusammenbau bereit. In der Testphase werden die berechneten Zusammenbaumaßhaltigkeiten mit den Zielwerten verglichen um den Netzwerkfehler E_{SSE} zu ermitteln. Ist dieser zufriedenstellend nach den oben genannten Kriterien (Minimum für E_{SSE} gefunden, sowie Gleichung 38 erfüllt) kann die Prognose der zu erwartenden Zusammenbaumaßhaltigkeiten bei Anwendung der Methode im Regelungszyklus starten.

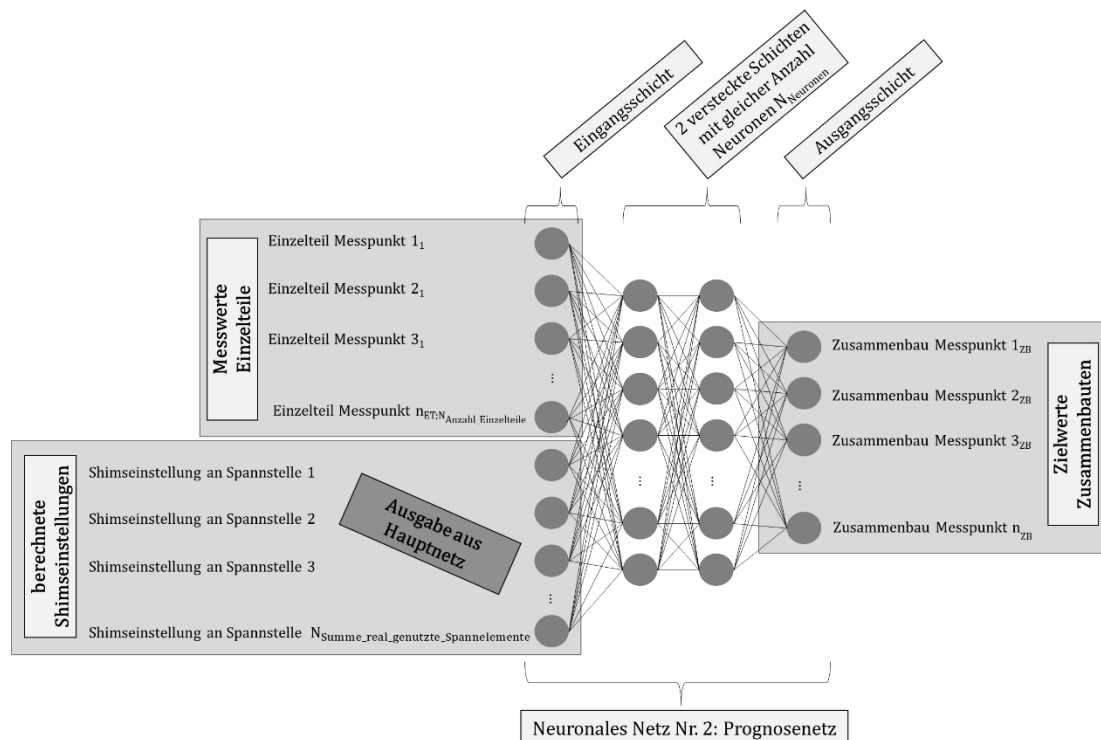


Abbildung 5.24: Schematische Darstellung des eingesetzten neuronalen Netzes in der Trainingsphase zur Prognose der Zusammenbaumaßhaltigkeiten.

In der Prognoseanwendung werden die Eingangsdaten der berechneten Shimseinstellungen gegen die nach dem oben vorgestellten Verfahren gemittelten, real möglichen Shimseinstellungen eingetauscht und die Zusammenbaumaßhaltigkeiten prognostiziert (Abbildung 5.25). Da es im vorliegenden Prüffall um die Beurteilung der Auswirkung der Mitte-

⁴¹ nicht die gemittelten, bzw. gerundeten Shimseinstellungen

lung der Shimseinstellungen geht, spielt es keine Rolle, dass die eingesetzten Einzelteilmaßhaltigkeiten bereits für Training- und Testphase verwendet worden sind, sofern in der Testphase ein Minimum von E_{SSE} gefunden wurde, was Voraussetzung ist⁴². Es lässt sich nun sowohl chargenidentisch als auch über den insgesamt vorliegenden DoE-Datensatz die Standardabweichung je Messpunkt am Zusammenbau ermitteln und mit der früheren Standardabweichung je Messpunkt vergleichen. Als Bewertung ist Gleichung 39 heranzuziehen. Ist also die Standardabweichung der einzelnen Merkmale an den simulierten Zusammenbauten über alle chargenidentischen Einzelteilkombinationen kleiner als die übliche Standardabweichung am jeweiligen Merkmal (ohne Anwendung der Methode) ist die Tauglichkeit der Methode simulativ bestätigt. Entsprechend ist der nächste Schritt das neuronale Netz (Hauptnetz) im laufenden Prozess als Bestandteil des Regelungszyklus einzusetzen. Ergibt sich bereits an dieser Stelle eine Diskrepanz, ist die Anwendung für die spezifische Anlage zu überdenken, da die Genauigkeit der Justageempfehlung für eine Verbesserung des Zusammenbauergebnisses nicht ausreicht. Hier ist es naheliegend, dass der individuell erreichte Netzwerkfehler bzw. die Messunsicherheit genügt um nach der vorliegende Methode Justageempfehlungen umzusetzen.

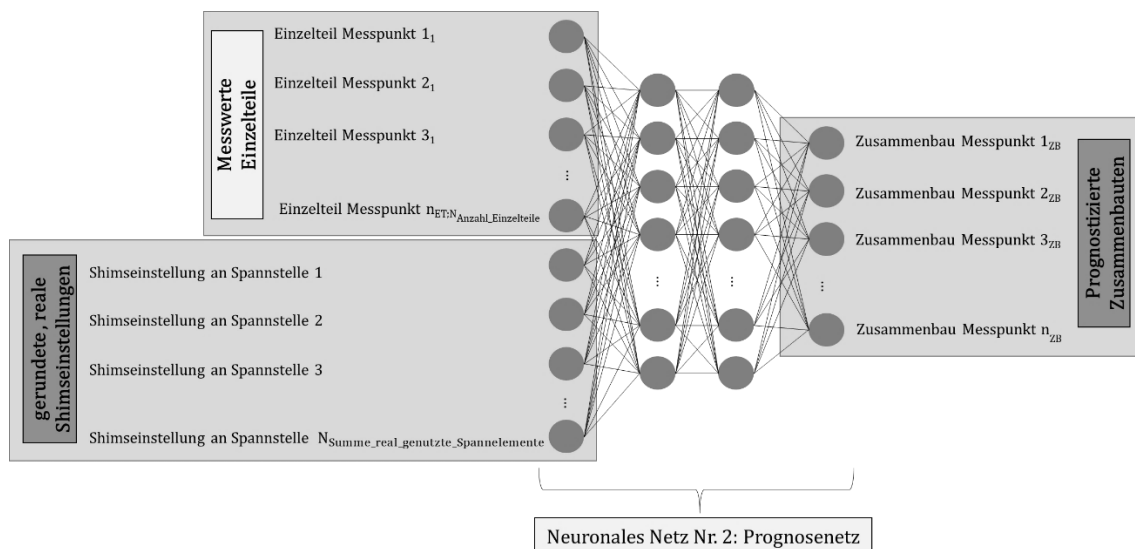


Abbildung 5.25: Schematische Darstellung des eingesetzten neuronalen Netzes in der Prognosephase der Zusammenbaumaßhaltigkeiten auf Basis der Justageempfehlung.

5.2 Regelungszyklus

Nach der erfolgreichen Vorbereitung des neuronalen Netzes kann es jetzt als Bestandteil eines Regelkreises eingesetzt werden (vgl. Abbildung 4.2).

⁴² Theoretisch können auch ganze originale Trainingsdaten durch ein Netz propagiert werden. Da E_{SSE} immer größer 0 ist, unterscheiden sich dann hierbei die Ausgabedaten des Netzes und der Ausgabevektor des Trainingsdatensatz trotzdem. Anderenfalls sind die Daten auswendig gelernt, was nicht erwünscht ist.

5.2.1 Eingangsdaten für neuronales Netz bereitstellen

Das Ziel des Regelkreises ist es auf Basis von Einzelteilabweichungen die notwendige Shimseinstellung zu berechnen um gewünschte Zielwerte am Zusammenbau bestmöglich bei entsprechender Justage des Prozesses zu erreichen. Das neuronale Netz benötigt daher sowohl die Einzelteilmessdaten aber auch die Zielwerte als Eingangsdaten für die Berechnung (vgl. Abbildung 5.21).

Festlegung der gewünschten Maßhaltigkeiten am Zusammenbau (Definition Zielwerte)

Die Zielwerte lassen sich über die im Entwicklungsprozess festgelegten Toleranzbänder ermitteln (vgl. Abbildung 5.22). Hier ist zu unterscheiden, ob eine symmetrische (Zielwert = 0) oder einseitige Toleranzvorgabe (Zielwert = Mittenwert des Toleranzbandes) vorliegt. Diese Werte bleiben, sofern während des Prozesses keine Änderung der Toleranzvorgaben vorliegt, für alle kommenden Regelungszyklen dieser Anlage konstant.

Anwendung Stationszeitprognose und Erzeugung Einzelteilmessdaten

Die Einzelteilmessdaten hingegen gilt es laufend für jede Berechnungsschleife zu aktualisieren. Gemäß Abbildung 5.11 sind auch im laufenden Serienprozess mittels der Stationszeitprognose (vgl. Kapitel 5.1.2) der verschiedenen Einzelteiltypen die vorliegenden chargenidentischen Einzelteilkombinationen zu ermitteln. Anhand eines Wochenplans gilt es daraufhin die Messmaschinenbelegung und die Werker für die Umsetzung der berechneten Justageempfehlung zu planen. Der Wochenplan ist laufend zu aktualisieren, sodass sobald ein neuer Chargenauftrag im Presswerk angelegt wird, diese Charge in den Wochenplan integriert wird. Die daraufhin aus dem Hochregal ausgeschleusten Einzelteile werden nach den gleichen Kriterien wie zur Erstellung des Trainingsdatensatzes vermessen (vgl. Kapitel 5.1). Mittels der ausgewählten und für geeignet befundenen Messmaschine sind jeweils $n_{\text{Mittelwert}}$ Bauteile je Einzelteiltyp je Charge zu vermessen. Abbildung 5.26 zeigt beispielhaft einen Wochenplan. Dieser eignet sich zur Durchsprache in einer wöchentlichen Regelkommunikation. Da sich Messung und Einsatzzeit der jeweiligen Chargen von den einzelnen Einzelteiltypen überschneiden können (vgl. Charge D2 und D3), ist es ratsam die jeweilige Berechnung des neuronalen Netzes erst so kurzfristig wie möglich vor Justageumsetzung durchzuführen, um Fehler in den Chargenkombinationen zu vermeiden. Je mehr Einzelteiltypen die Anlage beinhaltet, desto komplexer sind die zeitlichen Zusammenhänge. Die Rechenzeit des neuronalen Netzes ist dabei vernachlässigbar klein, da es jeweils nur um eine einmalige Propagation von $n_{\text{Mittelwert}}$ Messwertvektoren geht.

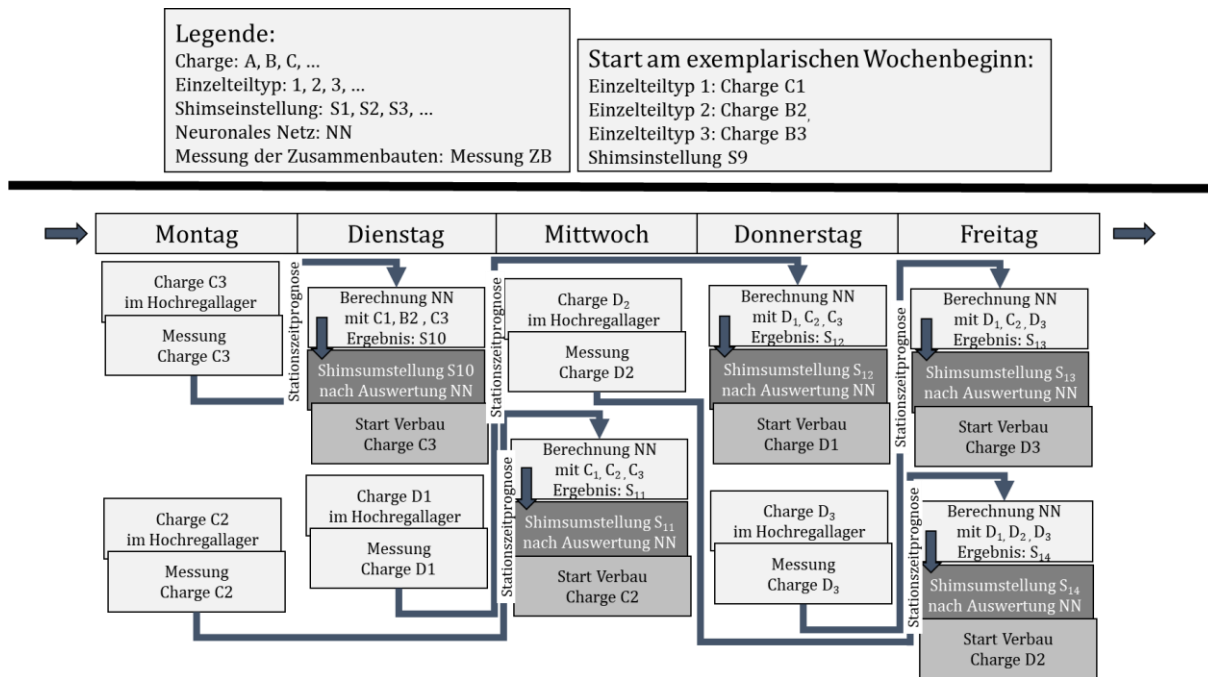


Abbildung 5.26: Schematische detaillierte Darstellung eines Wochenplans für die Anwendung des Regelungszyklus am Beispiel eines Zusammenbaus bestehend aus drei verschiedenen Einzelteiltypen.

5.2.2 Ausgangsdaten von neuronalem Netz verarbeiten

Optimale Shimseinstellung berechnen und real einsetzbare Justageempfehlung ableiten
 Zu festgelegten Zeiten (vgl. Abbildung 5.26) werden die ermittelten Messdaten gemäß der eingegebenen Chargenkombination und die definierten Zielwerte am Zusammenbau durch das neuronale Netz propagiert. Der Ausgabevektor entspricht der als optimal berechneten Shimseinstellung je Spannelement. Insgesamt werden $n_{\text{Mittelwert}}$ Datensätze pro chargenidentische Einzelteilkombination durchs Netz geschickt, dies bedeutet je Chargenkombination werden auch $n_{\text{Mittelwert}}$ „optimale“ Shimseinstellungen ausgegeben. Nun muss je Spannelement ein Mittelwert μ_{Shims} gebildet werden⁴³. Die verschiedenen, ermittelten Shimseinstellungen je Spannelement sollten analog der Robustheitsprüfung (vgl. Kapitel 5.1.4) annähernd gleich sein ($\sigma_{\text{Shims}} \rightarrow 0$). Darüber hinaus bieten viele langjährig gewachsene Karosseriebauanlagen nur diskrete Shimseinstellungen an. Da das neuronale Netz zunächst einmal eine als optimal angesehene Shimseinstellung berechnet, kann μ_{Shims} ggf. einen real nicht einstellbaren Wert angenommen haben. Drastische Ausreißer für berechnete Shimseinstellungen, die weitab von realen Einstellmöglichkeiten sind, sind zwar vorstellbar, sollten aber nur in den seltensten Fällen (auf Grund des vorherigen, gründlichen Trainings des neuronalen Netzes) vorkommen. μ_{Shims} gilt es gemäß Abbildung 5.16 auf die nächstmögliche reale Einstellmöglichkeit des Spannelements zu runden bzw. auf die jeweilig definierten Grenzen oSg_{real} und uSg_{real} zu setzen, falls der berechnete

⁴³ Nicht geeignet ist es, die Einzelteil-Messwerte anders herum zuerst zu Mitteln und dann durch das Netz zu propagieren, denn dann werden nichtreale Messwerte, also für das Netz wohlmöglich unbekannte Messwertkombinationen, verwendet, was zu ungeeigneten Shimseinstellungen führen kann.

Wert μ_{Shims} außerhalb des Intervalls der Shimseinstellmöglichkeiten liegt. Anschließend steht für jedes Spannelement die Justageempfehlung für die vorliegende Chargenkombination bereit.

Zeitpunkt des Einsatzes der neuen Shimseinstellung festlegen

Als letzten Schritt des jeweiligen Regelungszyklus gilt es nun die Verbindung zwischen der virtuellen und der physikalischen Ebene herzustellen – als Kopplungsglied fungiert die Stationszeitprognose (vgl. Kapitel 5.1.2). Bereits aus dem vorherigen Schritt ist der ungefähre Einsatzzeitpunkt der Charge bzw. der damit einhergehenden Chargenkombination zur Ansteuerung des neuronalen Netzes bekannt. Die Prognose ist schichtgenau und kann so zur Personalplanung im Voraus verwendet werden. Um nun noch effizienter in der Justageschicht zu agieren, lohnt es sich mit Gleichung 27 den Wechselzeitpunkt am Anfang des Tages bzw. der Schicht noch einmal erneut zu konkretisieren. Die Genauigkeit der Vorhersage hängt hier sehr stark vom eingesetzten Transportsystem und der Anlage ab. Je mehr ungeplante Störungen auftreten, desto ungenauer ist die Vorhersage. Zum vorhergesagten Zeitpunkt (bzw. mit etwas Vorlauf) sollte sich der Werker an der Anlage einfinden. Für die geplante Justage der Anlage sind Taktzeitkenntnisse gemäß Abbildung 5.17 notwendig. Im vorliegenden Fall bedeutet dies, dass wenn beispielsweise die Charge der Schlossverstärkung wechselt, bereits zwei Takte im Voraus die jeweiligen Shimsempfehlungen an den Spannelementen der vorgelagerten Takte, und dann dem Takt folgend die anderen Spannelemente angepasst werden müssen, bis an jeder Station der ausgewählten Anlage die jeweilige Shimsempfehlung eingestellt ist. Je nach Chargengröße kann es vorkommen, dass während einer Umsetzung einer Justageempfehlung, bereits neue Chargen im Hochregallager ankommen bzw. liegen, zu vermessen sind und bereits die nächste Berechnung zu absolvieren ist (vgl. Abbildung 5.26). Hierzu sind die beschriebenen Schritte in Kapitel 5.2.1 und Kapitel 5.2.2 zu wiederholen.

5.3 Validierungsphase

Erst durch Validierung eines Systems, im vorliegenden Fall des Regelzyklus, kann der Nachweis über dessen Tauglichkeit erbracht werden. Durch regelmäßige Validierung kann eine entsprechende Qualität des Regelkreises gewährleistet werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse der berechneten Justageempfehlungen im Sinne einer theoretischen Netzvalidierung überprüft.

5.3.1 Qualität des Regelkreises überprüfen

Gemäß Abbildung 2.2 und Abbildung 4.1 ist zur Überprüfung der Wirksamkeit der Regelung ein Abgleich der Zusammenbaumessdaten mit den Zielwerten bzw. Toleranzvorgaben durchzuführen.

Vorschrift des Validierungsintervalls festlegen

Essentiell bei der Überprüfung ist der richtige Zeitpunkt. Grundsätzlich ist eine Überprüfung jeder Shimsumstellung und ggf. sogar ein Online-Anpassen der Trainingsdaten vorteilhaft für das neuronale Netz und seine Leistungsfähigkeit, mindestens ist jedoch eine Überprüfung durchzuführen nach

- Neueinführung der Qualitätskontrolle auf Basis eines neuronalen Netzes
- Austausch von Anlagenkomponenten

Das erste Kriterium zielt darauf ab, mögliche Mängel im neuronalen Netz bzw. in seinen Trainingsdaten aufzudecken. Das zweite Kriterium ist notwendig, da sich durch Austausch von Komponenten das Übertragungsverhalten der Anlage ändern kann, was im ursprünglichen neuronalen Netz noch nicht berücksichtigt wurde.

Anwendung Stationszeitprognose und Erzeugung Zusammenbaumessdaten

Nach der vollständig absolvierten Justage (vgl. Kapitel 5.2.2) können die gefertigten Heckdeckel ausgeschleust und vermessen werden oder einer bestehenden Inline-Messtechnik zu geführt werden. Insgesamt werden $n_{\text{Mittelwert}}$ Zusammenbauten benötigt, um den Mittelwert und damit den Repräsentanten der chargenidentischen Einzelteilkombination am jeweiligen Messpunkt am Zusammenbau zu ermitteln (vgl. Kapitel 5.1.1). Dabei ist es aussagekräftiger, nicht alle Zusammenbauten nacheinander, sondern zu verschiedenen Zeitpunkten (zwingend aber vor der nächsten Justage) zu entnehmen (vgl. Kapitel 3.3), um so eine größere Bandbreite der Zusammenbaumaßhaltigkeiten abzudecken. Um die erzeugte Standardabweichung je Merkmal zu ermitteln sind mehrere Justagezyklen auf Basis des neuronalen Netzes durchzuführen um an eine größere Bandbreite an Zusammenbauten zu gelangen.

Abgleich der aufgenommenen Zusammenbaumessdaten mit den Ziel- und Toleranzvorgaben

Der jeweilig ermittelte Repräsentant je Messpunkt ist mit seinem zugehörigen Zielwert zu vergleichen. Durch Prozessschwankungen und den Einsatz von diskreten Shimseinstellungen ist zu erwarten, dass hier Abweichungen vorliegen werden. Diese Abweichungen gilt es im Folgenden zu interpretieren und daraus ggf. Handlungsempfehlungen abzuleiten. Generell sollten die Messwerte je Merkmal möglichst nah am Zielwert liegen und nur kleine Streuung besitzen. Entsprechend zeigt Abbildung 5.27 die möglichen Szenarien innerhalb der Toleranzgrenzen bei einer Auswertung. Nach einmaliger Justage auf Basis des neuronalen Netzes kann die Aussagekraft der Ergebnisse noch eingeschränkt sein. Bei fortschreitender Anwendung der Methode und entsprechendem Anwachsen der Datenmenge verbessert sich die Aussagekraft der Netzvalidierung. Der Erfolg des Einsatzes der vorliegenden Methode lässt sich in fünf aufeinander aufbauenden Stufen bewerten:

1. Real umsetzbare Justageempfehlung erhalten
2. Mittelwerte $\mu_{ZB,NEU}$ innerhalb des Toleranzbandes
3. $TB > 6 * \sigma_{ZB,NEU}$ (40)

$$4. \sigma_{ZB,ALT} > \sigma_{ZB,NEU} \quad (41)$$

$$5. \sigma_{ZB,ALT} > \sigma_{ZB,NEU} \text{ mit } \sigma_{ZB,NEU} \leq \sigma_{ZB,WUNSCH} \quad (42)$$

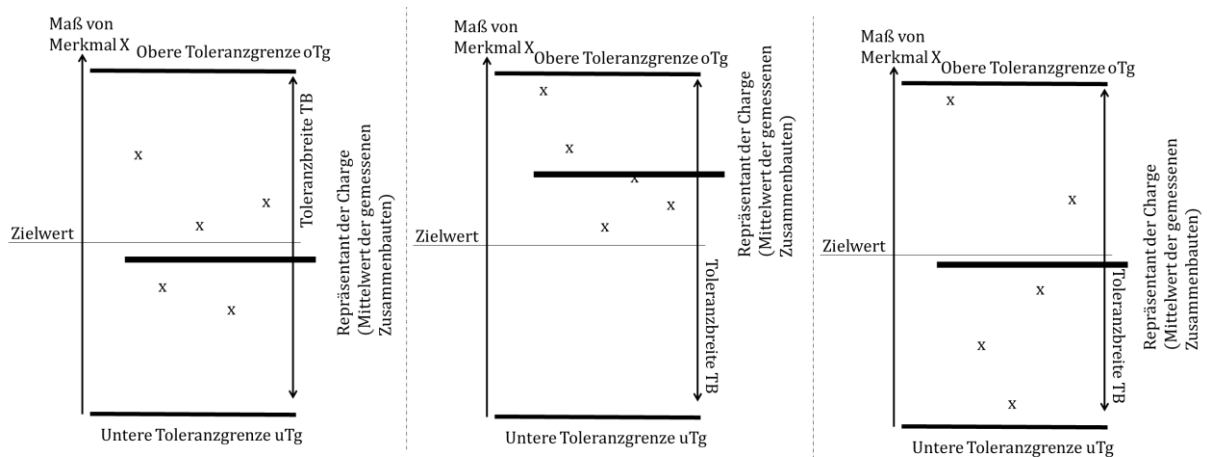


Abbildung 5.27: Schematische Darstellung der Bewertung der Tauglichkeit des neuronalen Netzes bei einer realen Anwendung anhand von einer umgesetzten Justageempfehlung; Links: Positives Ergebnis der Justage, Messwerte liegen innerhalb des Toleranzbandes und Mittelwert ist ähnlich dem Zielwert; Mitte: Messwerte liegen zwar innerhalb des Toleranzbandes, der erreichte Mittelwert weicht aber deutlich vom Zielwert ab; Rechts: der Mittelwert liegt zwar nah am Zielwert, ist aber mit so großer Streuung behaftet, dass keine belastbare Aussage getroffen werden kann – das linke Ergebnis ist besser zu bewerten als die beiden anderen.

Stufe 1 bedeutet, dass die Methode für die Anlage grundlegend geeignet ist und es möglich ist sinnvolle Justageempfehlungen zu ermitteln. Stufe 2 meint, dass sich der ermittelte Mittelwert des Merkmals innerhalb des Toleranzbandes befindet und mindestens 3 Standardabweichungen von den Toleranzgrenzen entfernt ist. Stufe 3 baut darauf auf und sagt aus, dass die erzeugten Zusammenbaumaßhaltigkeiten, also der justierte Fügeprozess, ein ausreichendes Prozesspotenzial (vgl. Gleichung 10) aufweist und sich innerhalb der Toleranzgrenzen befindet. Stufe 4 und 5 zielen darauf ab, dass die Methode den vorliegenden Fügeprozess verbessert hat, wobei Stufe 5 darüber hinaus auch die anvisierte Verbesserung erreicht bzw. sogar übertrifft. Ist keine der Stufen oder eine produktionsseitig mindestens geforderte Stufe nicht erreicht gilt es den Trainingsdatensatz zu erweitern. Zur Ermittlung der Standardabweichung σ_{ZB} ist eine ausreichende Stichprobenzahl an Zusammenbauten der Fertigungsanlage zu entnehmen und zu vermessen (vgl. Gleichung 13). Um das Vertrauensintervall I der Standardabweichung an dieser Stelle möglichst klein zu halten, ist (auf lange Sicht) eine Stichprobengröße größer 150 sinnvoll (vgl. Kapitel 3.3), da es hier konkret um die Bewertung des erzielten Ergebnisses der Anwendung der Methode geht, auf dessen Basis ggf. die Entscheidung für weitere Maßnahmen getroffen wird.

Ist eine produktionsseitig mindestens geforderte Stufe nicht erreicht, gilt es den Trainingsdatensatz zu erweitern und die vorliegende Methode ab Kapitel 5.1.3 mit einem größeren Versuchsplan (DoE) zu wiederholen. Hierzu sind erneut chargenidentische Einzelmessdaten aufzunehmen, diese Einzelteile in den Serienprozess einzuschleusen und als Zusammenbau dem Prozess zur Messung zu entnehmen. Die so neu ermittelten Trainingsdatensätze werden zu den bisher vorliegenden Trainingsdatensätzen hinzugefügt. Anschließend sind alle Schritte ab Kapitel 5.1.4 mit dem erweitertem Trainingsdatensatz zu wiederholen. Für jeden kommenden Regelungszyklus wird das optimierte Netz verwendet und auf dessen Basis die Validierungsphase erneut durchschritten.

IV Fazit

6. Diskussion

Die vorliegende Arbeit gliedert sich ein in die aktuelle Literatur zur produktionsseitigen Optimierung der Qualität in der Automobilindustrie (vgl. Kapitel 2.2.2). Zur Umsetzung kurzer Regelzyklen in der Produktion wurden Methoden angelehnt an die Bottom-Up Methodik vorgestellt: Dabei sind insbesondere [NEU 13], [LIE 05], [GER 14], [KEL 16]/[KEL 14] und [FRI17]/[FRI 12] zu nennen (Abbildung 6.1). Allen gemeinsam ist die Überlegung eine Arbeitspunktoptimierung auf Basis der nicht-veränderbaren Eingangsparameter durchzuführen. Dabei befassen sich die Arbeiten mit unterschiedlichen Produktionsschritten: Neumann [NEU 13] und Liedl [LIE 05] betrachten den Herstellungsprozess von Einzelteilen aus Rohmaterial, erstere aus Coilrollen im Presswerk und letzterer aus Kunststoff beim Spritzgießen. Gegenstand der vorliegenden Arbeit und der Arbeiten Keller et al [KEL 16] und Fritzsche et al [FRI 17] ist der Fügeprozess von Einzelteilen zu Zusammenbauten. Germer et al [GER 14] betrachten das Fügen von Zusammenbauten an die Karosserie. Die Arbeiten nutzen dabei verschiedene Modelle zur Abbildung des jeweiligen Produktionsschrittes, darunter FE-Simulation [NEU 13], Toleranzsimulation [GER 14], Gleichungssysteme [KEL 16] und neuronale Netze [FRI 17], [LIE 05]. Die genannten Arbeiten beziehen sich dabei unmittelbar auf industrielle Produktionsanlagen, wobei Keller et al [KEL 16] und Fritzsche et al [FRI 17] den Fokus auf die Demonstration an einem eigens entwickelten experimentellen Laborversuchsstand legen. Von alle genannten behandelt nur die vorliegende Arbeit die chargenweise Arbeitspunktoptimierung.

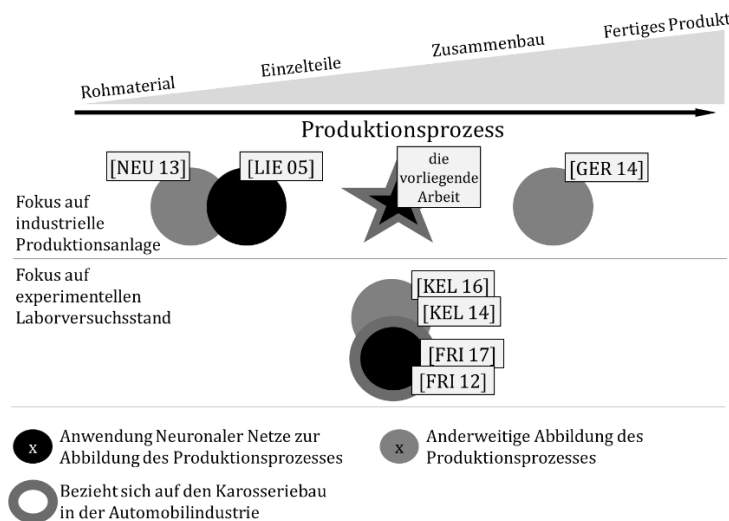


Abbildung 6.1: Schematische Einordnung aktueller Forschungsarbeiten hinsichtlich Lokalisierung im Produktionsprozess und der Anwendung künstlicher neuronaler Netze.

Die mit der vorliegenden Arbeit von der Zielrichtung her verwandtesten Arbeiten sind die Forschungsarbeiten von Fritzsche et al [FRI 17], [FRI 12] und Keller et al [KEL 16], [KEL 14]. Beide zielen darauf ab einen shimsassistierten Justageprozess im Karosseriebau zu optimieren. Dazu entwickelten die Autoren jeweils einen experimentellen Laborversuchsstand mit einfachster Geometrie. Dieser wird zur Demonstration genutzt, generell die Machbarkeit zu zeigen, mit digital berechneten Justageempfehlungen einen Zusammenbauprozess zu steuern. Keller et al stellen dafür entsprechend zu lösende Gleichungssysteme auf und Fritzsche et al leiten die notwendigen Shimsumstellungen aus einem zuvor trainierten neuronalen Netz ab. Bei letzterem geschieht dies in ähnlicher Weise wie in der vorliegenden Arbeit, indem ein neuronales Netz (auch mit zwei verdeckten Schichten) Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgabedaten findet. Ein Unterschied ist, dass die Shimsumstellungen nicht manuell, sondern mit einem extern ansteuerbaren hydraulischen Spannelement [FRI 12] funktionieren. Zukunftsziel der Autoren ist, dass durch Online-Messung der individuellen Bauteilmaßabweichungen während des Einspannens in der Fügestation direkt die hydraulischen Spannelemente geeignet justiert werden. Im Unterschied dazu zielt die vorliegende Arbeit darauf ab, chargenweise die Justageempfehlungen zu generieren, indem eine bestimmte Anzahl von Einzelteilen einer Charge für die Messung der chargenrepräsentativen geometrischen Maßabweichungen ausgeschleust wird. Daher ist ein wesentlicher Teil der vorliegenden Arbeit die Vorausschau der Stationszeit.

Als die methodisch verwandteste Forschungsarbeit erscheint die von Liedl [LIE 05]. Der Erkenntnis nach scheint diese Arbeit chronologisch die Erste zu sein, die neuronale Netze zur Arbeitspunktoptimierung im Produktionsprozess erfolgreich einsetzt, wie es auch das Ziel der vorliegenden Arbeit ist. Der Autor verwendet die Prozesskenngrößen beim Spritzgießen als Eingangsparameter für das Netz. Durch eine verbesserte Qualität und Qualitätsvorhersage können in diesem Fall Ausschuss und ansonsten notwendige zerstörende Prüfungen reduziert werden. Der Autor nutzt auch den hier verwendeten Brain Construction Algorithmus (vgl. Kapitel 3.1).

Germer et al [GER 14] nutzen die klassische Toleranzsimulation mit Steifigkeitsmatrizen zur Berechnung von Handlungsempfehlungen in der Rohbaumontage der Rückwandtür. Auch wenn diese Arbeit bereits den nächsten Produktionsschritt betrifft, ist die quantitativ messbare Zielsetzung wie hier, gleichmäßige Fugenmaße über die Flotte zu erhalten. Die Autoren haben einen Regelkreis konzipiert, der schichtweise Messdaten sammelt und anschließend analysiert. Dadurch kann der Regelkreis auf Veränderungen nur mit einer Frequenz von einigen Stunden reagieren. In der vorliegenden Arbeit kann der Regelkreis durch eine entsprechende prozessbegleitende Vorlaufzeit (chargenweise) quasi instantan reagieren – bei Fritzsche et al [FRI 17] und Keller et al [KEL 16] ist dies auch ohne Vorlaufzeit möglich. Mit dem vorangehenden Produktionsschritt befasst sich Neumann [NEU 13]: die Produkte des Presswerks (die hier verwendeten Einzelteile) bilden die Grundlage für die hier verwendeten Eingangsgrößen des neuronalen Netzes. Die Autorin setzt eine Arbeitspunktoptimierung mittels FE-Simulationen um, um durch Nachregelung

der Presswerkparameter eine gleichbleibende Qualität der Einzelteile je Charge zu erhalten.

Übertragbarkeit der Methode

Die entwickelte Methode zeichnet sich durch ihren Bezug zur Praxis aus, da sie beispielhaft die Schritte an einer realen Fertigungsanlage erläutert. Trotz der exemplarischen Anwendung der Methode an einer Heckdeckelfertigung ist die Anwendung nicht darauf beschränkt. Alle Schritte sind auch auf ähnliche Fertigungsanlagen im Karosseriebau übertragbar, hierbei sollte es sich aber um eine Anlage für fugenbildende Anbauteile, wie Klappen oder Türen handeln. Diese haben mit der Heckdeckelfertigung gemeinsam einen abgeschlossenen Prozess mit einer begrenzten Zahl an geometriefestlegenden Stationen (begrenzte Komplexität) zu bilden, auf dessen Basis die Prozessgrenzen sowie die Ein- und Ausgangsdaten inkl. Zielwerte eindeutig definiert werden können. Die Anwendung der Methode auf den gesamten Karosseriebau ist nicht zielführend, da die Komplexität und die damit einhergehende notwendigen Messumfänge nicht handhabbar sind. Ein schrittweiser Einsatz der Methode mit mehreren (miteinander verbundenen) neuronalen Netzen über verschieden abgegrenzte Bereiche des Produktionsprozesses ist denkbar.

Spann- und Fixierkonzept

Die Durchgängigkeit spielt bei der Wahl des Spann- und Fixierkonzepts für die entwickelte Methode eine entscheidende Rolle im Hinblick auf das Training des neuronalen Netzes. Die Annahme des Bestehens der größten Korrelationen bzw. Beziehungen an gemeinsamen Messpunktkoordinaten/-schnitte am Einzelteil, sowie am Zusammenbau kann nur zum Tragen kommen, wenn auch die Spann- und Fixierkonzepte (bestmöglich) vererbt sind. Neben der Lage der Punkte ist aber auch auf die Spannreihenfolge Wert zu legen, da sonst nicht gewährleistet werden kann, dass eine (für das neuronale Netz) erkennbare Beziehung zwischen den Einzelteil- und Zusammenbaumessdaten vorliegt.

Relevante Merkmale

Da der Karosseriebau, wie oben beschrieben, auf Grund seiner Komplexität dem Sondermaschinenbau zuzuschreiben ist, ist dieser Schritt sehr individuell auf die jeweils ausgewählte Anlage zu beziehen. Die Anzahl der Bauteile bzw. die geometrischen Besonderheiten und die Fügefolge, die zum ausgewählten Zusammenbau führen, könnten unterschiedlicher nicht sein. Selbst Heckdeckelfertigungsanlagen eines Herstellers unterscheiden sich untereinander sofern unterschiedliche Fahrzeugmodelle beliefert werden. Im Premiumsegment mit kleinen Stückzahlen sind z.B. auch kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe zur Herstellung von Heckdeckeln im Einsatz. Da vom Material unabhängig Beziehungen zwischen den Einzelteilmaßabweichungen, dem Fügeprozess und der Zusammenbaumaßhaltigkeit naturgemäß vorliegen, ist eine Überprüfung der Umsetzbarkeit der vorgestellten Methode mit anderen Materialien auch denkbar. Ein Vorteil hierbei ist, dass ein Heckdeckel aus kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) auf Grund der Materialeigenschaften aus weniger Bauteilen besteht, was den Messaufwand und die Komplexität des neuronalen Netzes reduziert. Wenn gleich die eingesetzten Materialien, die

Bauteilanzahl und entsprechende Ausführung der geometriefestlegenden Stationen sich unterscheiden, so hat die Auswahl der Messpunkte unabhängig davon nach demselben vorgegebenen Schema zu erfolgen. Hierzu sind die Bereiche am Bauteil zu identifizieren, dessen Maßhaltigkeit für die Verarbeitung in der Station selbst (Schweißbereiche, formstabile Bauteile) sowie darüber hinaus für die Maßhaltigkeit des Übergangs zu angrenzenden Bauteilen (Fugengebiete und Dichtflächen) von Bedeutung sind. Je weitläufiger die Systemgrenzen dabei definiert werden (s.o.), desto komplexer und anspruchsvoller ist die Festlegung der notwendigen Merkmale und des Prozesses. Durch weitere Forschung auf dem Gebiet der FE-Simulation für Karosseriebauprozesse kann es auch zukünftig bei entsprechender Modellgenauigkeit bei vertretbarem Rechenaufwand durch eine Sensitivitätsanalyse (vgl. Kapitel 2.2.1.1) möglich sein die relevanten Messpunkte digital festzulegen.

Messmaschinenfähigkeit

Neben der geeigneten Festlegung der Messpunkte ist es jedoch besonders wichtig, dass sich das festgelegte Merkmal auch mit dem definierten Messprozess ausreichend genau vermessen lässt. Hierbei spielt die herstellerseitig gelieferte Wiederholgenauigkeit der Messmaschine aber auch die richtige Wahl des Spann- und Fixierkonzepts (s.o.) unabhängig des Bauteilmaterials eine entscheidende Rolle. Je größer die Messunsicherheit ist, desto schwieriger können Zusammenhänge in den Daten mit Hilfe des neuronalen Netzes abgebildet werden, wodurch die Qualität des Regelkreises leidet. Ist die Messunsicherheit zu groß überschreibt diese alle vorhandenen Beziehungen in den Messdaten, sodass kein Minimum für E_{SSE} (neuronales Netz generalisiert nicht sondern lernt Daten nur auswendig) gefunden werden kann. Als Anhaltspunkt ist die „goldene Regel der Messtechnik“ für die Messunsicherheit zielführend, wenn das entsprechende Toleranzband gemäß den realen Produktionsvorgaben und -bedingungen gewählt wird.

Chargenidentische Repräsentation

Um auf die Nutzung von Repräsentationswerten je Charge zurückzugreifen dürfen sich die Bauteilabweichungen je Messpunkt der einzelnen Chargen untereinander vornehmlich nur im Mittelwert unterscheiden und nicht in der Standardabweichung. Dies ist beispielsweise, wie bei der vorliegenden Fertigungsanlage vorliegend, bei einem vorgelagerten Presswerkprozess mit entsprechendem Nachregelkonzept nach Neumann [NEU 13] gegeben. Die Standardabweichung bzw. die obere Grenze des Vertrauensintervalls der Standardabweichung muss dabei deutlich kleiner sein als die Toleranzbreite (vgl. Gleichung 20), damit ein begrenzter Auszug von Einzelteilen einer Charge auch die Maßhaltigkeit der gesamten Charge repräsentieren kann. Ist die Standardabweichung der Einzelteile groß sind im Sinne der Verzehnfachungsregel (vgl. Abbildung 1.2) zunächst die Prozesse im Presswerk zu optimieren, da über das Repräsentationsverfahren die Fertigungsanlage jeweils chargenweise justiert werden soll. Ein bauteilbezogener Qualitätsregelkreis lässt sich hingegen sowohl wirtschaftlich als auch zeitlich (benötigter Messaufwand) mit der hier beschriebenen Methode nicht umsetzen. Wird der Zusammenbau aus anderen Materialien hergestellt, wie z.B. aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen

(CFK), bei denen sich die Einzelteile nicht ohne weiteres Chargen zuteilen lassen, muss zunächst der Herstellungsprozess analysiert werden. Ist analog [NEU 13] ein Nachregeln der Prozessparameter denkbar, lassen sich beispielsweise zeitlich eingeschränkte Chargen definieren. Ist dies nicht der Fall und die Maßabweichungen sind entsprechend je nach Einzelteil sehr individuell, so ist die Justage auch je Einzelteilkombination durchzuführen (Anzahl Zusammenbauten je chargenidentischer Einzelteilkombination = 1). Die höhere Frequenz der Justage erfordert mehr Mess- und Einstellaufwand. Hier sei angemerkt, dass die Stückzahl und die damit einhergehende Taktzeit von CFK-Anbauteilen deutlich geringer ist als bei Anbauteilen z.B. aus Aluminiumlegierung.

Stationszeitprognose

Zwar müssen auch ohne Anwendung der Methode regelmäßig Justagevorgänge vorgenommen werden, selten werden diese aber in hoher Frequenz durchgeführt, da nach einer manuellen Auswertung der letzten Messungen die Justagezeitpunkte nach eigenem Ermessen vom Werker festgelegt werden. Je genauer der Tag, die Schicht, die Stunde oder gar die Minute des bevorstehenden Chargenwechsels vorhergesagt werden kann, desto effizienter kann die Planung der Werker bzw. der Anlagen erfolgen, was dann wiederum eine häufigere Justage ermöglicht. Ganz frei von Unsicherheiten ist die Prognose der Chargenwechsellpunkte aber nicht: Die erste Unsicherheit der Prognose eines Chargenwechsels fließt bereits bei der Bestimmung der Chargenreichweite ein. Die herangezogene Chargengröße kann im Realfall Abweichungen zwischen im Presswerkauftrag vermerkter Größe und gelieferter Größe aufweisen. Dies ist oftmals auf Störungen, Ausschuss oder Lagerbestand der Coils zurückzuführen. Die Abweichung, ab der eine Nachberechnung der Chargenreichweite nach Einlagerung ins Hochregallager stattfinden sollte, hängt maßgeblich von der Taktzeit der Anlage ab. Je schneller die Anlage produziert und Bauteile verarbeitet, desto genauer muss die Bestimmung der Reichweite erfolgen. Genauso gilt, dass je kleiner eine Charge ausfällt, desto genauer muss der Chargenwechselzeitpunkt prognostiziert werden, da die Wechsel deutlich schneller aufeinander folgen. Ein weiterer Unsicherheitsfaktor, der einfließt, ist das auszuwählende Prognoseverfahren. Der gleitende Mittelwert an sich kann übers Jahr verteilt bereits sehr gut Prognosen abgeben, da sich insgesamt gesehen die Tagesabrufzahlen nicht drastisch unterscheiden. Bei stark volatilem Verhalten, weist er jedoch Nachteile auf. Auch die exponentielle Glättung zweiter Ordnung passt sich zu langsam an, um die Produktionsspitzen und -tiefs vor und in den Urlaubszeiten abzubilden. Der Ansatz über die Prognose mittels eines Saisonfaktors und eines Korrekturfaktors erwies sich daher als zielführender. Praktisch wurden in der vorliegenden Arbeit zur Prognose Excel-Makros⁴⁴ programmiert und verwendet. Dies erfordert zunächst ein manuelles Eintragen und Auslesen der Daten, lässt sich aber mit angemessenem Zeitaufwand praktizieren, indem die Chargengröße jeweils von den Presswerkmitarbeitern eingepflegt und die Tagesvorhersagen vom Karosseriebaumitarbeiter in regelmäßigen Abständen ausgelesen werden. Die Häufigkeit des Auslesens hängt maßgeblich von den durchschnittlichen Chargengrößen des zu prognostizierenden Einzelteils

⁴⁴ Tabellenverarbeitungsprogramm

ab. Eine automatisierte Lösung über entsprechende Schnittstellen ist dabei auf lange Sicht hin anzustreben. Darüber hinaus müssen zur genauen Prognose des Wechselzeitpunkts die zu erwartenden Störungen einfließen, die zum Stillstand der Anlage führen. Werden diese Störungen nicht berücksichtigt, führen sie zu einem Fehler in der Prognose des Chargenwechselzeitpunkts. Eine genauere Untersuchung der Störungen kann diese möglicherweise in stochastische und nicht-stochastische (z.B. periodisch-wiederkehrende) differenzieren, um so zu einer besseren Prognose zu kommen. So lange diese nicht untersucht sind, ist ein einfacher Versuch den Prognosefehler zu reduzieren eine zeitliche Mittelung der erfahrungsgemäß vorliegenden Störzeiten zu addieren. Die bestmögliche Prognose wird erhalten, wenn die Anlage ohne Störungen betrieben wird.

Digitale Lokalisierung von Ladungsträgern

Die Bauteile werden in Ladungsträger verpackt transportiert, die jedoch selten im Produktionsprozess digital erfasst werden. Moderne Hochregallager weisen immer häufiger einen Abgangs- und Zugangsscan auf, sodass die Bestände überwacht werden können. Der Ausgangsscan am Hochregallager kann genutzt werden, um den Wechselzeitpunkt zu konkretisieren. Der berechnete Wechselzeitpunkt kann dann nur noch vom aktuellen Pufferstatus, welcher auch digital zu verarbeiten ist, und von Störungen im Transportprozess beeinflusst werden. Zu diesem Zeitpunkt sind unvorhersehbare Störungen auf Grund der überschaubaren Zeit bis zum Chargenwechsel aber händelbar. Eine Integration eines Eingangsscans an der Anlage ist mit geringem Aufwand verbunden und bringt bei der Umsetzung der Justage deutliche Vorteile. Der Werker muss dann nicht an der Anlage warten und aufmerksam sein, um den richtigen Zeitpunkt zu erwischen, sondern die Anlage gibt dem Werker ein Signal, kurz bevor er handeln muss. Im Hochregallager wird verbreitet das First-In-First-Out Prinzip angewandt. Die Reihenfolge der Ladungsträger kann jedoch innerhalb einer Charge als auch über Chargen hinweg aus verschiedensten Gründen verschoben sein:

- Verschmutzung der Bauteile → Bauteile fahren im Ladungsträger zunächst zum Waschplatz und werden dann wieder in den Fluss eingereiht
- Veränderung der Reihenfolge durch manuelle Prozesse → Gabelstaplerfahrer arbeiten nicht automatisiert, und stapeln die Ladungsträger ggf. nach anderen Kriterien
- Puffer an Produktionsanlage → Oftmals werden freie Lagerflächen als zusätzliche Pufferfläche verwendet, hier gibt es selten eine definierte Lagerordnung

Eine Verschiebung der Reihenfolge der Ladungsträger kann ohne Warnung durch einen Eingangsscan an der Anlage dazu führen, dass Bauteile aus der alten Charge mit der auf die neue Chargenkombination hin angepassten Shimseinstellung verbaut werden und somit die Maßhaltigkeit des Zusammenbaus vermindert wird. Eine Überschneidung der Chargen ist daher durch geeignete Pufferstrategien und Handlungsanweisungen für eventuell manuelle Logistikprozesse zu vermeiden.

Produktionseinschränkung durch Vorbereitungsphase

Die Durchführung der Vorbereitungsphase an der Anlage muss so kurz wie möglich gehalten werden, um den Eingriff in die produktive Phase der Anlage so gering wie möglich zu halten. Jede Standzeit bzw. Phase, in der die Anlage keine Teile für den Verkauf produzieren kann, verursacht dem Unternehmen zusätzliche Kosten. Gleichzeitig sollte durch die während der Durchführung des Versuchsplans gefertigten Zusammenbauten kein Ausschuss entstehen. Die zu trainierenden Shimseinstellungen sind daher immer in zielführenden Bereichen angesiedelt, damit das neuronale Netz in diesen Bereichen bestmöglich trainiert werden kann. Dementsprechend können die Zusammenbauten nach dem Messprozess dem normalen Serienprozess wieder zugefügt werden. Von daher ist eine nichtbauteilbeeinflussende Markierung jedes einzelnen Einzelteils (und nicht nur der Einzelteilladungsträger) für eine durchgängige Identifizierung während der Durchführung des DoEs wichtig: z.B. mit einem abwaschbaren Wachsstift oder im Rahmen der Entwicklungen von Industrie 4.0 mit RFID-Chips, solange die Bauteileigenschaften dadurch nicht verändert werden. Bei der Auswahl der benötigten Shimseinstellungen und dem Aufstellen des Versuchsplans sind aber immer die Bedingungen und die Zugänglichkeiten der Anlage mit einzubeziehen. Essentiell wichtig ist es, irreale und nicht relevante Shimseinstellungen dabei auszuklammern, was den Versuchsraum bei vielen Anlagen deutlich optimiert (Aufwand-Nutzen-Verhältnis). Die notwendigen Kriterien des DoEs sind jedoch einzuhalten und dabei der Versuchsplan so groß wie möglich zu definieren, um dem neuronalen Netz so viele Informationen wie möglich während der Trainingsphase bereitstellen zu können. Bei fortschreitendem Stand der Technik können durchgängige FE-Prozesssimulationen, wie oben beschrieben, die Fertigungsanlage in der Vorbereitungsphase weiter entlasten. Mit simulierten Einzelteilmaßabweichungen kann das entsprechende Prozessverhalten des Zusammenbauprozesses (inkl. Justage) simuliert, die dazugehörigen Zusammenbaumaßhaltigkeiten ausgegeben und so mit „geringerem physikalischem“ Aufwand⁴⁵ der Versuchsraum vergrößert und das Training des neuronalen Netzes verbessert werden. Der Entfall des Ausschleusens und Messens der Zusammenbauten ginge damit einher. Aber auch der Aufwand des Messens der Einzelteile je Charge kann durch entsprechende digitale Entwicklungen reduziert werden. Neumann [NEU 13] entwickelte ein Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk. Hiermit ist es theoretisch möglich Maßhaltigkeiten der Einzelteile anhand der Werkstoffkennwerte der Coils und den Pressparametern vorhersagen zu können. Unter serienmäßigem Einsatz und Kombination der beiden Methoden kann der Messaufwand theoretisch gegen Null gehen. Einzig für die Validierung des neuronalen Netzes sind dann noch reale Messungen durchzuführen, jedoch ist davon auszugehen, dass je größer der Versuchsraum gewählt wird, desto gleichmäßigere Maßhaltigkeitsergebnisse können am Zusammenbau durch die empfohlenen Shimseinstellungen des neuronalen Netzes erzeugt werden. Trotz der aufgezeigten Vorteile und Unterstützungen, die sich durch eine FE-Simulation ergeben, kann aber eine vollumfängliche FEM-Abbildung des Serienprozesses das neuronale Netz

⁴⁵ Entsprechende Rechenleistung wird benötigt

im Regelungszyklus nicht vollständig ersetzen: FE-Modelle, vor allem in der hier vorzuliegenden notwendigen Komplexität, übersteigen bei Weitem die verfügbare Rechenzeiten zwischen zwei Shimseinstellungen⁴⁶.

Objektivierung

Langjährig gesammeltes Werkerwissen kann durch eine Qualitätskontrolle auf Basis eines neuronalen Netzes objektiviert, gebündelt und gesichert werden. Der sich oft über Monate erstreckende Anlauf von Anlagen kann zielgerichtet zum Einrichten des neuronalen Netzes genutzt werden. Auf Grund des Black-Box-Charakters eines neuronalen Netzes ist es aber nicht oder nur sehr abstrakt möglich das Wissen über die Wirkzusammenhänge des Prozesses für Werker nachträglich zugänglich zu machen. Soll das Wissen der Werker, welches normalerweise in der Anlaufphase gesammelt und erweitert wird, nicht gänzlich verschwinden ist diese Phase parallel zu nutzen.

Größe des Trainingsdatensatz

Da die Komplexität der Abbildung der jeweils spezifischen Anlage zumeist unbekannt ist, ist die notwendige Größe des Trainingsdatensatzes nicht allgemeingültig vorhersagbar und produktionsstättenabhängig. Dies führt zu einer Erschwerung der Erstellung des Messplans. Auf Grund der mit der Vorbereitungsphase einhergehenden Produktionseinschränkungen bei Produktionsanlagen mit manuellen Spannelementen, kann die entwickelte Methode bei Notwendigkeit eines sehr großen Trainingsdatensatzes mit erheblichem Aufwand verbunden sein. Die Vorbereitungsphase sollte natürlich nur einen Bruchteil des Lebenszyklus der Anlage einnehmen, also deutlich weniger als die Zeit bis das Nachfolgefahrgeschäft produziert wird (meist 7 Jahre).

Dynamische Zielwertanpassung

Die Festlegung der Zielwerte des neuronalen Netzes auf die Mittenwerte der Toleranzvorgaben ist prinzipiell zielführend. Vor allem bei Anbauteilen spielen für das Fugenergebnis aber nicht nur die Schwankungen der Maßhaltigkeit der Zusammenbauten eine Rolle, sondern auch vor allen Dingen die Maßhaltigkeit der Karosserie. Hierzu wird oftmals das sogenannte Best-Fit-Verfahren [BOH 13] zum gezielten Zusammenbringen zweier Bauteile basierend auf einer vorangehenden Vermessung der jeweiligen Maßabweichungen zur Vermittlung der Toleranzen verwendet. Dem Verfahren sind jedoch Grenzen gesetzt: Zwei nicht-maßhaltige Bauteile werden real selten ein ergebnisoptimales Fugenergebnis erzielen. Entsprechend kann das Verfahren dahingehend unterstützt werden, indem die gelieferten Bauteile (hier der Heckdeckel und die Karosserie) bereits sehr maßhaltig sind, bzw. bereits die prozessbedingten Maßabweichungen zueinander passen. Zur Erweiterung der hier entwickelten Methode, um ein gleichmäßiges Flottener-

⁴⁶ Kästle [KÄS 16] gibt beispielsweise eine Rechenzeit von bis zu 50 Stunden für eine Falzsimulation einer Motorhaube an trotz Nutzung von MPP-Gleichungslösern (Massively Parallel Processing) auf einem Rechencluster mit 128 CPUs an und weist dabei eindeutig auf die größte Herausforderung bei den FE-Simulationen hin.

gebnis nicht nur über die Heckdeckel-Maßhaltigkeit sondern auch über die Fugen zu erlangen, ist es denkbar, die jeweiligen Zielwerte an die entsprechenden Karosseriemaßabweichungen hin dynamisch anzupassen. Gemäß Abbildung 6.2 ist eine Verbauprognose der chargenidentischen Zusammenbauten an der Anbaulinie zu ermitteln. Dementsprechend sind die vermessenen Maßabweichungen der Karosserien als berechnete Zielwerte an das neuronale Netz zurückzukoppeln und die Berechnung der Shimseinstellungen (Kapitel 5.2.2) und die Justage auf dieser Basis auszuführen.

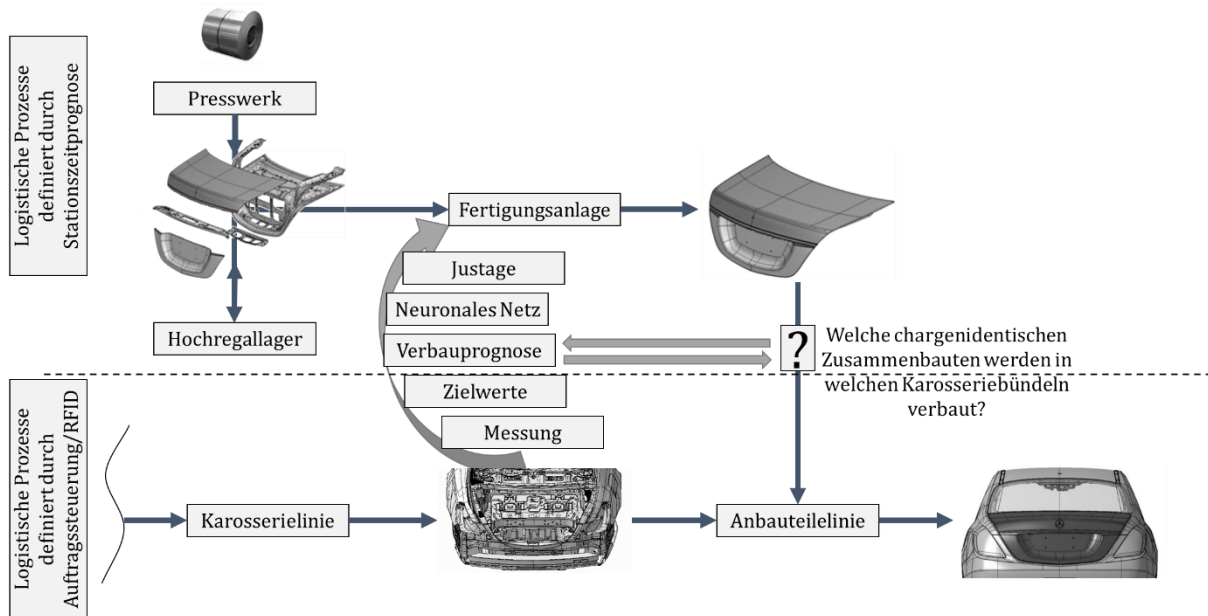


Abbildung 6.2: Mögliche Erweiterung der Methode zur Objektivierung und Optimierung der Qualitätskontrolle im Karosseriebau für fugenbildende Anbauteile mit kontinuierlicher Anpassung der Zielwerte auf Basis der Karosseriemessdaten

Zukünftige Erweiterungsmöglichkeiten

Wird das Regelkonzept komplex (z.B. Zusammenbau aus vielen verschiedenen Einzelteiltypen) und damit die Justage an der Anlage der Anbauteile dadurch häufiger (mehr Einzelteiltypen entsprechen zwangsläufig häufigeren Chargenwechseln), so ist eine extern ansteuerbare Shimslösung zu empfehlen, welche die Stand- und Justagezeiten minimiert. Der Einsatz eines stufenlosen Justagekonzepts, z.B. auf Hydraulikbasis schöpft die Möglichkeiten des Einsatzes des trainierten Netzes aus. Jedoch weisen neben dem oftmals nicht leistbaren zusätzlichen Investitionsaufwand Fritzsche et al [FRI 12] auch auf damit einhergehende Steifigkeitsprobleme an den hydraulischen Spannstellen hin. Auch eine vollständige Automatisierung der vorgestellten objektivierten und optimierten Qualitätskontrolle ist bei steigender Komplexität wünschenswert.

Durchspielen der Validierung der Methode im konkreten Einsatz

Die ersten technischen Schritte für die produktionsbegleitende Anwendung der hier vorgestellten Methode sind durchgeführt, dazu gehören die Prozessanalyse und die Stationszeitprognose. Der Werksleiter muss die entsprechende Zustimmung für die Einführung

der Methode geben und bei folgenden begleitenden Schritten unterstützen. Trotz des hohen Automatisierungsgrads im Karosseriebau werden viele Nebenschritte manuell durch Menschen erledigt. In die Umsetzung müssen daher auch Mitarbeiter aus dem Messhaus, dem Presswerk und dem Karosseriebau involviert und durchgängiger Zugriff auf die Computer gewährleistet werden. Täglich müssen die Mitarbeiter vom Presswerk die abgepressten Chargengrößen als Variablen in der Datenbank der Stationszeitprognose aktualisieren. Die Messhaus-Mitarbeiter müssen die aufgenommenen Messwerte für das neuronale Netz zugänglich machen. Und die Werker im Karosseriebau erhalten über die Stationszeitprognose die anstehenden Chargenwechselzeitpunkte (siehe Kapitel 5.1.2). Um Abstimmungsschwierigkeiten zu vermeiden sollte eine Person ausgewählt werden, die hauptverantwortlich für die Pflege des Netzes beauftragt ist. Sobald Ladungsträger einer neuen Charge im Hochregallager am Eingangsscan erkannt werden, muss dieser ans Messhaus umgeleitet werden. Hier werden entsprechend der festgelegten Messkriterien die Einzelteilmaßhaltigkeiten je Charge ermittelt und in der Vorbereitungsphase die vermessenen Bauteile markiert. Die Justageempfehlung ist vom Werker im Karosseriebau – in der Vorbereitungsphase basierend auf den Anforderungen des DoEs und in der Regelzyklusphase auf Basis der Ausgabe des neuronalen Netzes umzusetzen. Anschließend müssen die Karosseriebaumitarbeiter die entsprechenden Zusammenbauten vermessen bzw. den Mitarbeitern im Messhaus in ausreichender Zahl zur Verfügung stellen. Entsprechende Schritte müssen sowohl in der Vorbereitungs- als auch in der Durchführungsphase vorgenommen werden. Wenn all die oben genannten organisatorischen Belange definiert sind kann zusammenfassend vorhergesagt werden, welche Wirksamkeit für die Methode zu erwarten ist und in welchen Schritten die größten Schwierigkeiten zu erwarten sind. Vier Hauptaspekte sind als besonders kritisch zu nennen:

1. eine zu hohe Messunsicherheit,
2. ein zu umfangreicher Messaufwand in der Vorbereitungsphase (siehe oben),
3. zu geringe oder keine tatsächlichen Beziehungen zwischen den Einzelteilmessdaten, den Zusammenbaumessdaten und den Justageeinstellungen,
4. eine zu große Streuung innerhalb der Einzelteilchargen.

Die reale Chance der Methode liegt darin werkerunabhängig Justageentscheidungen nutzen zu können. Gleichzeitig wird es vermutlich eine Herausforderung sein, dass die Empfehlungen des neuronalen Netzes wirklich Justageempfehlungen ergeben, die besser sind als die des Werkers mit jahrzehnter langer Erfahrung. In persönlicher Betrachtung ist Punkt 2 vermutlich der kritischste. Die tatsächliche Anwendung der Methode wird Antworten auf diese Hypothesen liefern.

Die nächsten Schritte für die Heckdeckelfertigung

Aufbauend auf der hier vorgestellten Methode schließen sich nun einige logische nächste Schritte für vorliegende Heckdeckelfertigung an. Dazu gehören die Vervollständigung und Durchführung des vollumfänglichen Messplans, darauf aufbauend die Trainings- und

Testphase des neuronalen Netzes und anschließend die Implementierung und Verwendung des neuronalen Netzes im bestehenden Regelkreis, indem die berechneten Shims-empfehlungen umgesetzt werden. Diese anschließenden Schritte ermöglichen erstens die reale Prüfung der Methode und zweitens ihren Einsatz im realen Produktionsablauf. Wie bereits beschrieben sind diese Schritte anlagenspezifisch durchzuführen.

7. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wird eine Methode vorgestellt, die zum gezielten objektiven Eingreifen in einen shimsbasierten Fügeprozess bei fugenbildenden Anbauteilen befähigt. Erstmals werden entsprechende Justageanweisungen chargenweise über ein neuronales Netz ermittelt, welches Verknüpfungen zwischen Einzelteil- und Zusammenbaumaßhaltigkeiten im Fügeprozess findet. Die Methode wird hier neu entwickelt, am Beispiel eines Heckdeckelzusammenbaus detailliert ausgearbeitet sowie kritische, theoretische und experimentelle Teilschritte prüfend durchgeführt. Insbesondere werden anlagenspezifische Besonderheiten und typisches Vorhandensein gewachsener Strukturen praxisnah berücksichtigt und in die Methode implementiert. Ihre entsprechenden Möglichkeiten, Grenzen und Erweiterungen werden diskutiert.

Die beispielhaft ausgewählte Heckdeckelfertigung nutzt im Karosseriebau weit verbreitete Fügeverfahren wie Laserschweißen und Klebe-Falzen. Mittels dieser Verfahren wird der Heckdeckelzusammenbau aus sieben blechumgeformten Einzelteilen (Innenteil, Beplankung oben und unten, Verschlussblech, Verstärkung Schloss, Verstärkung Scharnier rechts und links) aus Aluminium-Legierung mit Blechdicken von 1 mm bis 1,5 mm hergestellt. Die hieran exemplarisch demonstrierte Methode nach Bottom-Up Vorgehensweise lässt sich in drei Hauptschritte gliedern:

- Vorbereitungsphase
- Regelungszyklus
- Validierungsphase

Die Vorbereitungsphase hat zum Ziel auf Basis einer Prozessanalyse und eines Messplans einen Trainingsdatensatz aus Messdaten zu generieren und ein entsprechend trainiertes künstliches neuronales Netz, welches den Hauptbestandteil des Regelungszyklus ausmacht, bereitzustellen. Die Validierungsphase dient zur Überprüfung des Regelungszyklus und zur Ableitung möglicher Handlungsempfehlungen bzgl. der Optimierung des neuronalen Netzes.

Zu Beginn der Prozessanalyse sind die Systemgrenzen zu definieren und die Bauteile hinsichtlich ihrer Eigenschaften und Merkmale zu analysieren. In fugenbildenden Karosseriebauanlagen spielen dabei vor allem formstabile Bauteile eine maßgebliche Rolle. Darüber hinaus sind aber auch fugenrelevante Bereiche sowie Füge- und Dichtflächen nicht zu vernachlässigen. Die Bauteilmaßhaltigkeit kann je Merkmal über die Kennwerte Mittelwert und Standardabweichung gut beschrieben werden. Zur Auswahl einer geeigneten Messmaschine und Überprüfung der Reproduzierbarkeit des angewandten Spann- und Fixierkonzepts dienen dabei die Richtlinien des VDAs und die „goldene Regel der Messtechnik“. Zur Prüfung der Eignung des vorliegenden Presswerkprozesses wird exemplarisch das Prozesspotenzial einer Charge ermittelt. Die Standardabweichung je Charge ist dabei klein, weil die Regelstrategie im Presswerk zur Herstellung der Einzelteile über den Zeitraum gleichbleibend ist. Dies ermöglicht es davon Abstand zu nehmen jedes Einzelteil

als Individuum zu vermessen und im Hinblick auf eine ausreichende Näherung stattdessen Mittelwerte als chargenumfängliche Repräsentanten zu setzen. Entsprechend werden die Chargenwechsel als Maßabweichungswechsel identifiziert und eine Stationszeitprognose des Logistikprozesses entwickelt, um diese vorherzusagen. Zur Ermittlung von maßlichen Zusammenhängen zwischen Einzelteil und Zusammenbau gilt es hierzu vermessene Einzelteile dem laufenden Serienprozess wieder zuzufügen und die daraus entstandenen Zusammenbauten entsprechend auch zu vermessen. Um dabei die Belegung von Messmaschine und Fertigungsanlage so kurz wie möglich innerhalb der Vorbereitungsphase zu halten und damit dem Unternehmen unnötige Kosten zu ersparen, wird ein reduzierter Versuchsraum nach Design of Experiments (DoE) verwendet. Zur Demonstration der prinzipiellen Machbarkeit wurden zwei chargenidentische Versuchsreihen aus Einzelteilen und den dazugehörigen Zusammenbauten vermessen und analysiert. Entsprechend zusätzliche Möglichkeiten zur Minimierung des notwendigen Messaufwands wurden diskutiert. Bei der Erzeugung des auf den Messdaten basierenden neuronalen Netzes fanden der BCA-Algorithmus und die Resilient Backpropagation Anwendung. Zur Überprüfung der Robustheit und Prognose des Erfolgs des trainierten Netzes ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Leitfaden erarbeitet worden. Darüber hinaus ist auch die Anwendung des Netzes im Regelungszyklus und die darauf aufbauende Justage der Anlage beschrieben. Im Rahmen der Validierung kann das erzielte Ergebnis eingeordnet werden. Eine serienprozessbegleitende Umsetzung der Justageempfehlungen geschah im Rahmen der vorliegenden Dissertation nicht – dies ist der nächste Schritt für folgende Forschungsarbeiten.

Insgesamt zeigt die vorliegende Arbeit eine Methode auf, mit der die Qualitätskontrolle von bestehenden, langjährig gewachsenen Karosseriebauanlagen objektiviert und potenziell optimiert werden kann. Sowohl durch die stetig voranschreitende Automatisierung von Logistikprozessen als auch auf dem Gebiet der Abbildung von Karosseriebauprozessen mit Simulationsmodellen sind zukünftige Beiträge zu erwarten, die zur Erweiterung der vorliegenden Methode geeignet sind. Entsprechende Möglichkeiten der Erweiterung, wie digitale Bestandserfassung und -lokalisierung oder hydraulikgestützte stufenlose Justageeinstellungen oder dynamische Anpassung von Zielwertvorgaben zur Online-Korrektur von Karosserieabweichungen werden formuliert. Mit der vorliegenden Arbeit wird eine Methode aufgezeigt, mit der idealerweise sowohl erfahrene als auch neu eingelernte Mitarbeiter bei der Entscheidungsfindung für chargenweise Justage im laufenden Serienprozess unterstützt werden können.

Literaturverzeichnis

- [AMA 13] Amato, F.; Lopez, A.; Pena-Mendez, E. M.; Vanhara, P.; Hampl, A.; Havel, J.: *Artificial neural networks in medical diagnosis*, Journal of Applied Biomedicine, Nr. 11, S. 47-58, 2013
- [AMS 13] Magazin auto, motor und sport, Sonderheft: *Report: Qualität und Zuverlässigkeit*, Qualitätsreport 2013, Nr. 26/2013, S. 136-148, 2013
- [ARC 03] Archibald, B. C.; Koehler, A.B.: *Normalization of the seasonal factors in Winter's methods*, Int. J. Forecasting 19, 2003
- [BAR 88] Bartl, M.: *Erfahrungen und Konsequenzen aus Halle 54*, Neue Anwendungsgebiete und Entwicklungstrends, Springer Verlag, 1988
- [BAS 00] Basheer, I. A.; Hajmeer, M.: *Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application*, Journal of Microbiological Methods, Nr. 43, S. 3-31, 2000
- [BAU 14] Bauernhansl, T.: *Die vierte industrielle Revolution – der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma*, Handbuch Industrie 4.0 Produktion, Automatisierung und Logistik, Springer Verlag, 2014
- [BEH 10] Behrens, B.-A.; Doege, E.: *Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen*, 2. Auflage, Heidelberg, Springer Verlag, 2010
- [BEN 02] Bente, G.; Krämer, N. C.; Petersen, A.: *Virtuelle Realitäten*, Hogrefe Verlag, 2002
- [BIR 13] Birkert, A.; Haage, S.; Straub, M.: *Karosserietechnik und Karosseriewerkstoffe*, Springer Verlag, 2013
- [BLU 04] Blum, S.: *Mehrzieloptimierung durch evolutionäre Algorithmen*, Proceedings Weimarer Optimierung- und Stochastiktag, 2004
- [BOH 12] Bohn, M.; Steinle, P.; Wuttke, F.: *Early stage geometrical deviation optimization – an automotive example for sheet metal parts*, Applied Mechanics and Materials Vol. 104, 2012
- [BOH 13] Bohn, M.; Hetsch, K.: *Toleranzmanagement im Automobilbau*, Hanser, München, 2013
- [BOH 98] Bohn, M.: *Toleranzmanagement im Entwicklungsprozeß, Reduzierung der Auswirkungen von Toleranzen auf Zusammenbauten der Automobil-Karosserien*, Dissertation, Karlsruhe, 1998

- [BOR 03] Borgelt, C.; Klawonn, F.; Kruse, R.; Nauck, D.: *Neuro-Fuzzy-Systeme – von der Grundlage künstlicher Neuronaler Netze zur Kopplung mit Fuzzy-Systemen*, 3. Auflage, Vieweg, 2003
- [BRA 11] Braess, H.-H.; Seiffert, U. (Hrsg.): *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, 6. Auflage, Springer Verlag, 2011
- [BRAC 11] Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S.: *Digitale Fabrik – Methoden und Praxisbeispiele*, Springer, 2011
- [BROS 98] Brosius, F.: *Professionelle Statistik unter Windows*, MITP-Verlag, 1998.
- [BRO 98] Brouer, B.: *Regelungstechnik für Maschinenbauer*, 2. Auflage, Springer Verlag, 1998
- [BUS 07] Busche, C. H.: *Bestimmung und Beschreibung des Elastizitätsmoduls von Blechwerkstoffen nach dem Umformen: Ein Beitrag zur Verbesserung der Rückfederungsvorhersage*, Dissertation, Shaker, 2007
- [CAR 05] Carsley, J. E.: *Microstructural evolution during bending: Conventional vs. Roller hemming*, Trends in Materials and Manufacturing Technologies for Transportation Industries and Powder Metallurgy, Research and Development in the Transportation Industry, 6th MPMD Global Innovations Symposium, San Francisco, 2005
- [CHA 88] Chan, L. K.; Cheng, S. W.; Spiring, F. A.: *A new measure of process capability: C_{pm}* , Journal of Quality Technology, Vol. 20, No. 3, 1988
- [DIE 14] Dietrich, E.; Schulze, A.: *Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation*, 7. aktualisierte Auflage, Hanser, 2014
- [DIN 1319-1] Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN 1319-1: Grundlagen der Messtechnik: Teil 1: Grundbegriffe*, Beuth Verlag, Berlin, 1995
- [DIN 1910-100] Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN 1910-100: Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe - Teil 100: Metallschweißprozesse mit Ergänzungen zu DIN EN 14610*, Beuth Verlag, Berlin, 2008
- [DIN 55 350] Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN 55350-T11: Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik: Grundbegriffe der Qualitätssicherung*, Beuth Verlag GmbH Berlin, 1989
- [DEU 95] Deutscher Verband für Schweißtechnik; Fachgruppe: Schweißtechnische Ingenieursausbildung: *Fügetechnik, Schweißtechnik*, 5. Auflage, DSV Verlag, Düsseldorf, 1995

- [DIL 05] Dilthey, U.: *Schweißtechnische Fertigungsverfahren: 2. Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen*, 3. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg 2005
- [DUE 79] Dück, W.: *Optimierung unter mehreren Zielen*, Reihe Wissenschaft, S. 13-49, Vieweg + Teubner Verlag, 1979
- [DUD 05] Duddeck, F.: *Multidisziplinäre Optimierung im Produktentwicklungsprozess der Automobilindustrie*, Proceedings Weimarer Optimierung-und Stochastiktag, 2005
- [EBE 10] Eber, W.: *Simulation – von der prozeduralen zur objektorientierten Modellierung*, Tag des Baubetriebs, TU München, 2010
- [FRI 11] Fritzsche, R.; Richter, A.; Pfeifer, M.: *Karosserieteile effizient und ressourcenarm zusammenfügen*, Maschinenmarkt H. 18, S. 26–28, 2011
- [FRI 12] Fritzsche, R.; Neugebauer, R.; Walzl, H.; Pfeifer, M.: *Intelligenter Karosseriebau*, wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 102, 2012
- [FRI 17] Fritzsche, R.; Richter, A.; Putz, M.: *Automatic adjustment of car body fixtures using artificial intelligence*, 10th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 2017
- [GAN 11] Gannous, A. S.; Elhaddad, Y. R.: *Improving an Artificial Neural Network Model to Predict Thyroid Bending Protein Diagnosis Using Preprocessing Techniques*, WASET, Nr. 50, S.124–128, 2011
- [GEN 10] Genuit, K.: *Sound-Engineering im Automobilbereich – Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen*, Springer Verlag, 2010
- [GER 03] Germer, C.; Franke, H.-J.: *interdisziplinäres Toleranzmanagement*, 14. Symposium „Design for X“, Neuenkirchen, 2003
- [GER 14] Germer, C.; Nagat, M.; Klenk, T.: *Die virtuelle Messdatenanalyse bei Volkswagen*, VDI Fachbericht Konstruktion, S. 94-98, Oktober 2014
- [GLA 99] Glancy, C. G.; Chase, K. W.: *A Second-Order Method for Assembly Tolerance Analysis*, Proceedings of the ASME Design Automation Conference, Las Vegas, 1999
- [GOE 10] Goedel, V.; Annen, C.; Merklein, M.; Kolleck, R. (Hrsg.): *Material Modelling for Stochastic Simulation*, Proceedings of the IDDRG2010, S. 687-696, Graz, 2010

- [GRA 02] Grasse, J.: *Beitrag zur Gestaltung eines Qualitätsmethodenverbundes in der Karosserieentwicklung und -planung*, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2002
- [GRO 08] Grossenbacher, K.: *Virtuelle Planung der Prozessrobustheit in der Blechumformung*, Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, VDI Verlag, Reihe 2 Fertigungstechnik, 2008
- [GUH 10] Guh, R.-S.: *Simultaneous process mean and variance monitoring using artificial neuronal networks*, Computers & Industrial Engineering 58, S. 739-753, 2010
- [GUS 14] Gust, P.: *Toleranzen – geometrische Produktspezifikationen schaffen Qualität*, Maschinenbau, S. 769-796, Springer Verlag, 2014
- [HAR 09] Hartung, J.; Elpelt, B.; Klöser K.-H.: *Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*, Oldenbourg Verlag, München, 2009
- [HAR 10] Hartmann, C.: *Qualität und Kundenorientierung: Intelligent produzieren*, S. 148-152, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2010
- [HAZ 77] Hazod, W.: *Stetige Faltungshalbgruppen von Wahrscheinlichkeitsmaßen und erzeugende Distributionen*, Lecture Notes in Mathematics Volume 595, Springer Verlag, 1977
- [HEI 10] Heingärtner, J.: *Intelligente Datenanalyse für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung in der Umformtechnik*, Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2011
- [HEN 97] Henning, H.: *Toleranzsimulation in der Karosserieentwicklung bei VW*, Proceedings of the 8th Symposium on Design for Manufacturing, Schnaittach/Erlangen, 1997
- [HES 96] Hesse, S.; Seitz, G.: *Anwendung von Robotertechnik*, Robotik, Vieweg + Teubner Verlag, 1996
- [HOR 11] Hora, P.(Hrsg.); Heingärtner, J.; Maopulo, N.; Tong, L.; Hortig, D.; Neumann, A.; Roll, K.: *On the way from an ideal virtual process to the modelling of the real stochastic behavior*, Proceeding of the Forming Technology Forum: Zero Failure Production Methods, Zurich, 2011
- [HU 01] Hu, M.; Lin, Z.; Lai, X.; Ni, J.: *Simulation and analysis of assembly processes considering compliant, non ideal parts and tooling variations*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 41, 2001

- [ILZ 05] Ilzarbe, L.: *Wirkung von Einflussgrößen – insbesondere der Produktqualität – auf die Kundenzufriedenheit in der Automobilindustrie*, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2005
- [JAN 03] Jang, K.-Y.; Yang, K.; Kang, C.: *Application of artificial neuronal network to identify non-random variation patterns on the run chat in automotive assembly process*, International journal of Production Research, Nr. 41:6, S. 1239-1254, 2003
- [JON 06] Jonkers, B.: *Simulation of the Robot Roller Hemming process*, Bunschoten, Universität Twente, 2006
- [JOR 12] Jorden, W.; Schütte, W.: *Form- und Lagetoleranzen: Handbuch für Studium und Praxis*, 7. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [JUN 97] Junker, J.: *Die Anforderungen des Marktes: Automatisierung und kundennahe Produktion – vom Rohbau zum Präzisions-Karosseriebau*, Fertigungstechnisches Kolloquium, S.218-225, Springer Verlag, 1997
- [KAM 18] Kamps, U., Springer Gabler Verlag (Hrsg.): *Gabler Wirtschaftslexikon*, Stichwort: Grenzwertsatz, online im Internet: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/4159/grenzwertsatz-v11.html>, dauerhaft bereitgestellt
- [KÄH 08] Kähler, W.-M.: *Statistische Datenanalyse: Verfahren verstehen und mit SPSS gekonnt einsetzen*, 5. Auflage, Vieweg & Sohn, Wiesbaden, 2008
- [KÄS 16] Kästle, C.: *Simulationsmethode zur Beurteilung der Maßhaltigkeit von rollgefalzten Karosseriebaugruppen im Zusammenbau*, Dissertation, Universität Stuttgart, 2016
- [KEF 15] Keferstein, C. P.; Marxer, M.: *Fertigungsmesstechnik*, 8. Auflage, Springer Verlag, 2015
- [KEL 14] Keller, C.: *Force-controlled adjustment of car body fixtures*, Conference on Assembly Technologies and Systems, Procedia CIRP 23, 2014
- [KEL 16] Keller, C.; Putz, M.: *Force-controlled adjustment of car body fixtures – verification and performance of the new approach*, 6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS), Procedia CIRP 44, 2016
- [KLE 06] Klein, B.: *Toleranzmanagement im Maschinen- und Fahrzeugbau*, Oldenbourg Verlag München Wien, 2006

- [KOE 04] König, H.; Müller, M.: *100 Jahre Automobilbau Chemnitz – Zwickau: Tradition und Innovation im Karosseriebau der AUDI AG*, 21. - 23. September 2004 im Congress Center Dresden, 2004
- [KRA 14] Krahn, H.; Storz, M.: *Konstruktionsleitfaden, Anwendungsbeispiele aus der Praxis*, Springer Verlag, Wiesbaden, 2014
- [KRE 06] Kreiß, J.-P.; Neuhaus, G.: *Einführung in die Zeitreihenanalyse*, Springer Verlage, 2006
- [KRI 07] Kriesel, D.: *Ein kleiner Überblick über Neuronale Netze*, erhältlich auf <http://www.dkriesel.com>, 2007
- [KRO 09] Kropik, M.: *Produktionsleitsysteme in der Automobilfertigung*, 1. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, 2009
- [KUK 13] Kuklok, K.: *Falzen kleiner Radien*, kein Verlag, Sindelfingen, 2013
- [LEO 87] Leonhard, W.: *Einführung in die Regelungstechnik: Lineare und Nichtlineare*, 4. Auflage, Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 1987
- [LEU 10] Leuschel, R.: *Toleranzmanagement in der Produktentwicklung am Beispiel der Karosserie im Automobilbau*, Dissertation, Bergakademie Freiberg, 2010
- [LEV 44] Levenberg, K.: *A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares*, Quart. Appl. Math. 2, S. 164-168, 1944
- [LIE 05] Liedl, P.: *Automatische Online-Früherkennung von Qualitätsschwankungen und Störungen bei zyklischen und kontinuierlichen Prozessen*, Dissertation, Universität Stuttgart, 2005
- [LIU 98] Liu, C. S.; Hu, J. S.: *Sheet metal joint configurations and their variation characteristics*, ASME Journal Manufacturing Science and Engineering, Nr. 3, 1998
- [LIU 95] Liu, C. S.: *Variation Simulation of Deformable Sheet Metal Assembly*, Dissertation, University of Michigan, 1995
- [MAC 02] Macho, S.: *Kognitive Modellierung mit Neuronalen Netzen: eine anwendungsorientierte Einführung*, Huber, Bern, 2002
- [MAR 63] Marquardt, D.: *An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters*, SIAM J. Appl. Math. 11, S. 431-441, 1963

- [MAZ 08] Mazurowski, M.; Habas, P.; Zurada, J.; Lo, J.; Baker, J.; Tourassi, G.: *Training neural network classifiers for medical decision making: the effects of imbalanced datasets on classification performance*, neural networks; Nr. 21, S. 427–436, 2008
- [MCK 79] McKay, M. D., Beckmann, R. J.; Conover W.J.: *A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code*, Technometrics, Nr. 21(2), S. 239–245, 1979
- [MCK 05] McKinsey and Company: *Tomorrow's Automotive Production: Results of a study on trends, developments and strategies in car manufacturing*, McKinsey and Company, Aachen, 2005
- [MER 12] Mertens, P. (Hrsg); Rässler, S. (Hrsg): *Prognoserechnung*, 7. Wesentlich, überarbeitete und erweiterte Auflage, Physica-Verlag, 2013
- [MIC 11] Mickel, P.-M.: *Methoden zur Eigenschaftendarstellung von Laserstrahlschweißen im Karosseriebau*, Dissertation, TU Dresden, 2011
- [MEY 12] Meyer, R.: *Erhöhung der Prozesssicherheit durch Beherrschung der Bauteilabweichung beim Fügen im Karosseriebau*, 1. Auflage, TUDpress Verlag der Wissenschaft, Dresden, 2012
- [MOE 07] Mößmer, H. E.; Schedlbauer, M.; Günthner, W. A.: *Die automobile Welt im Umbruch: Neue Wege in der Automobillogistik*, S.3-15, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2007
- [MOS 06] Mosler, K.; Schmid, F.: *Wahrscheinlichkeitsrechnung und schließende Statistik*, 2. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, 2006
- [NET 02] Nethe, A.: *Prozessmodellbildung - Theorie und Anwendung*, Köster, Berlin, 2002
- [NEU 13] Neumann, A.: *Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk*, Fertigungstechnik-Erlangen, Meisenbach Verlag, Erlangen, Dissertation, 2013
- [NUF 10] Nufer, D.; Braunscheiner, A.: *Gute Qualitätssicherung oder niedrige Herstellkosten?*, Laser Technik Journal 7.6, S.18-21, 2010
- [OPF 08] Opfer, G.: *Numerische Mathematik für Anfänger - Eine Einführung für Mathematiker, Ingenieure und Informatiker*, Springer Vieweg, 2008
- [PAC 07] Pacella, M.; Semeraro, Q.: *Using recurrent neural networks to detect changes in autocorrelated processes for quality monitoring*, Computers & Industrial Engineering 52, S. 502-520, 2007

- [PAP 16] Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3: Vektoranalysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung, Mathematische Statistik, Fehler – und Ausgleichsrechnung, 7. Auflage, Springer Vieweg, 2016
- [PAU 13] Paulwitz, M.: *Karosseriebauanlagen aus dem Baukasten*, etz elektrotechnik & automation, 08/2013
- [PAW 11] Pawar, S.; Chavan H.; Chavan S.: *Tolerance Stack Up Analysis And Simulation Using Visualization VSA*, International Journal of Advanced Engineering Technology, IJAET, Vol.II, Issue I, S.169-175, 2011
- [PET 04] Petri, H.: *Automobilstandort Deutschland – heute und morgen*, Unterlagen zur Gastvorlesung, 2004
- [PET 06] Petsch, N.: *Beölung von Feinblech in Band und Tafeln*, Stahl-Informationszentrum, Merkblatt 127, 2006
- [PFE 10] Pfeifer, T.; Schmitt, R.: *Fertigungsmesstechnik*, 3. überarbeitete Auflage, Oldenbourg Verlag München, 2010
- [POP 05] Poprawe, R.: *Lasertechnik für die Fertigung: Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur*, 1. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, 2005
- [PSA 11] Psarakis, S.: *The Use of Neural Networks in Statistical Process Control Charts, Quality and Reliability*, Engineering International 27, S. 641-650, 2011
- [PYZ 97] Pyzdek, T.: *Motorola's Six Sigma Program*, Quality Digest, 1997
- [REFA 87] REFA Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V. (Hrsg.): *Methodenlehre der Betriebsorganisation*, Hanser, München, 1987
- [REY 11] Rey, G. D.; Wender, K. F.: *Neuronale Netze, Eine Einführung in die Grundlagen, Anwendungen und Datenauswertung*, 2. Auflage, Verlag Hans Huber, 2011
- [RIE 93] Riedmiller, M.; Braun, H.: *A direct adaptive method for faster backpropagation learning: The rprop algorithm*, Neural Networks, IEEE International Conference on, IEEE, S. 586–591, 1993
- [RHE 13] Rheinhold, O.: *Endlich Bescheid wissen*, Big Data im Handelsblatt, 1.Auflage, Reflex Verlag, Berlin, 2013
- [RIE 03] Riedel, F. (Hrsg.); Matthes, K.-J.: *Fügetechnik: Überblick, Löten, Kleben, Fügen durch Umformen*, 1. Auflage, Hansa Verlag, München, 2003

- [ROS 08] Roscher, J.: *Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie*, Dissertation, Universität Stuttgart, 2008
- [ROST 14] Rostami Mehr, M.: *Comprehensive Analysis of the Body-in-white Process Chain to Identify Impact Factors on Dimensional Accuracy*, University of Applied Sciences Emden-Leer, 2014
- [SCA 09] Scansonic GmbH: *Aus Leidenschaft für Perfektion, Laserbearbeitungsoptiken der Scansonic GmbH*, Unternehmenspräsentation, 2009
- [SCHM 07] Schmelzer, H.J.; Sesselmann W.: *Geschäftsprozessmanagement in der Praxis*, 6. Aufl., Hanser, 2007
- [SCHM 14] Schmidhuber, J.: *Deep learning in neural networks: An overview*, Neural Networks 61, Elsevier, 2015
- [SCHU 13] Schumacher, A.: *Optimierung mechanischer Strukturen, Grundlage und industrielle Anwendung*, 2. aktualisierte und erweiterte Auflage, Springer Verlag, 2013
- [SIE 10] Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*, Springer Verlag, 2010
- [SIM 95] Simon, D.: *Fertigungsregelung – Bestandteil einer umfassenden Produktionsregelung*, iwv Forschungsberichte, Nr. 85, S. 26-39, 1995
- [STA 03] Stackelberg B.: *Konstruktionsverfahren vorwärtsgerichteter neuronaler Netze*, Dissertation, Universität Stuttgart, 2003
- [STA 94] Stark, R.: *Entwicklung eines mathematischen Toleranzmodells zur Integration in (3D-) CAD-Systeme*, Dissertation, Universität des Saarlandes, 1994
- [STO 10] Stockinger, A.: *Computer Aided Robust Design – Verknüpfung rechnerunterstützter Entwicklung und virtueller Fertigung als Baustein des Toleranzmanagements*, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2010
- [TEM 16] Tempelmeier, H.; Günther, H.-O.: *Produktion und Logistik: Supply Chain und Operationsmanagement*, 12. Auflage, BoD - Books on Demand, , 2016
- [TIE 09] Tiedt, H.: *Virtuelle Qualitätsbewertung großflächiger Karosserie-Anbauteile durch Simulation von Funktionseinflüssen an digitalen rekonstruierten Bauteilen*, Dissertation, Universität Magdeburg, 2009
- [TRO 11] Troll, D.: *Einführung in die Finite-Element-Methode*, CAE-Workshop, Karlsruher Institut für Technologie, IPEK, 2011

- [THA 02] Thamm, A.; Deiler, G.; Yun, J.-W.: *Vielpunkt-Zieheinrichtung an hydraulischen Pressen*, Doege, E. (Hrsg.): 17. Umformtechnisches Kolloquium: Umformtechnik – Erschließung wirtschaftlicher und technologischer Potenziale, S. 129-136, Hannover, 2002
- [UNG 09] Ungemach, G.: *Simulation toleranzbehafteter Karosseriestrukturen und deren virtuelle Qualitätsbeurteilung*, Dissertation, Logos Verlag, Berlin, 2009
- [VDA 4] Verband der Automobilindustrie (Hrsg.): *Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie: Sicherung der Qualität während der Produktrealisierung, Methoden und Verfahren, Prozessfähigkeitsuntersuchung*, 4. Auflage, Verband der Automobilindustrie, 2003
- [VDA 5] Verband der Automobilindustrie (Hrsg.): *Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie: Prüfprozesseignung*, 2. Auflage, Verband der Automobilindustrie, 2011
- [VDI 13] VDI-Richtlinie 3633: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen*, VDI Verlag, Düsseldorf, 2013
- [VOL 12] Volling, T.: *Vorlesung Automobilproduktion*, Vorlesungsunterlagen TU Braunschweig, 2012
- [WAT 12] Wattenberg, K.; Mahler, K.; Wiehe L.; Breitling, T.; Dragon, L.; Bauer, W.: *Ohne Prototypen schneller ans Ziel, A-Klasse Digitale Absicherung*, ATZ-extra, Volume 17, Issue 4, S. 92-96, 2012
- [WIL 04] Will, J.; Riedel, J.; Bucher, C.; Raasch, I.: *Suche nach alternativen Gesamtfahrzeugkonzepten mit OptiSLang*, Proceedings Weimarer Optimierung- und Stochastiktag, 2004
- [WIN 60] Winters, P. R.: *Forecasting Sales by Exponentially Weighted Moving Averages*, Management Science 6, S. 324 ff., 1960
- [WIN 13] Winkler, H. (Hrsg.): *Anwendungsorientierte Beiträge zum Industriellen Management*, Logos Verlag Berlin GmbH, 2013
- [WIT 93] Wittig, K.-J.: *Qualitätsmanagement in der Praxis: DIN ISO 9000, Lean Production, Total-Quality-Management, Einführung eines QM-Systems im Unternehmen*, 1. Auflage, Teubner, Stuttgart, 1993
- [WITT 11] Wittmann, S.: *Verfahren zur Simulation und Analyse der Auswirkungen toleranzbedingter Bauteilabweichungen*, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2011

Liste der eigenen Publikationen

Beckmann, A.; Bohn, M.; Gust. P.: *Tolerance Simulation in the Assembling Process based on Experimental Data from Series Production*, 13th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, Hangzhou (China), 2014

Beckmann, A.; Bohn, M.; Gust. P.: *Serienproduktionsbegleitende Materialflusssimulation für Maßhaltigkeitsoptimierung in der komplexen Karosseriefertigung*, ASIM - 22. Symposium Simulationstechnik, Berlin (Deutschland), 2014

Beckmann, A.; Bohn, M.; Gust. P.: *Meta Modelling of Body-in-White Processes as a sustainable Knowledge base during series production*, NAFEMS World Congress, San Diego (USA), 2015

Betreute studentische Arbeiten

Wienke, L.: *Entwicklung eines Toleranzkonzeptes im Karosseriebau unter Berücksichtigung von Werkzeugen der Industrie 4.0*, Masterarbeit, TU Braunschweig, 2013

Griesmar, M.: *Konzeptionierung und Umsetzung eines Modells zur Simulation von Zusammenbaugenauigkeiten im Rohbau der S-Klasse*, Masterarbeit, KIT Karlsruhe, 2014

Riekert, M.: *Konzeptionierung und Entwicklung eines Materialflussmodells und Analyse-tools zur ganzheitlichen Bauteilverfolgung und -analyse in der Serienproduktion der S-Klasse*, Bachelorarbeit, Hochschule Reutlingen, 2014

Shao, Y.: *FEM-Simulation abweichungsbehafteter Fügeprozesse von dünnwandigen Blechteilen im Karosseriebau*, Masterarbeit, RWTH Aachen, 2015

Lebensweg

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.