

Lehrstuhl für Umformtechnik

Department Product Engineering,
Montanuniversität Leoben



Modell zur Risikobetrachtung des Herstellungsprozesses geschweißter Edelstahlrohre

An der

Montanuniversität Leoben

im November 2007 eingereichte

Dissertation

des

Dipl.-Ing. Stefan Weiß

Ich erkläre von Eides statt,
dass ich die vorliegende Dissertation über das Thema:

*Modell zur Risikobetrachtung des Herstellungsprozesses geschweißter
Edelstahlrohre*

selbstständig, unter Verwendung der im Literaturverzeichnis angeführten
Veröffentlichungen, verfasst habe.

(Dipl.-Ing. Stefan Weiß)

Trautmannsdorf, im November 2007

Mein besonderer Dank gilt Herrn o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Bruno Buchmayr, Leiter des Lehrstuhls für Umformtechnik der Montanuniversität Leoben, der meiner Arbeit stets großes Interesse entgegenbrachte und mich durch wertvolle Anregungen und zielorientierte Hinweise wesentlich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt hat. Seine überlegte Herangehensweise, sich mit Problemstellungen auseinanderzusetzen und der Zielsetzung dabei eine ganzheitliche Sichtweise zu bewahren, ergänzt durch seine stets konstruktive und hilfsbereite Haltung auf zwischenmenschlicher Ebene, ist für mich Maßstab meines eigenen Verhaltens.

Herrn o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Hubert Biedermann, Leiter des Lehrstuhls für Wirtschafts- und Betriebswissenschaften der Montanuniversität Leoben, danke ich für die Übernahme des Koreferats.

Die Idee zu dieser Arbeit entsprang meiner Tätigkeit als technischer Leiter bei fischer Edelstahlrohre AUSTRIA GmbH. An dieser Stelle möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Dr. Heinz Paar, als Geschäftsführer von fischer Edelstahlrohre AUSTRIA GmbH, für den Freiraum eine solche Arbeit erstellen und die Inhalte in der beruflichen Praxis anwenden zu können, aufrichtig danken.

Danken möchte ich meinen Mitarbeitern bei fischer Edelstahlrohre AUSTRIA GmbH, die mir durch ihr selbstständiges und verantwortungsvolles Handeln den notwendigen Freiraum verschafft haben, diese Arbeit neben meiner beruflichen Tätigkeit zu schreiben.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern und meiner Lebensgefährtin Elisabeth für den guten Zuspruch und die stets fürsorgliche Entlastung in Bezug auf die Mühen des Alltags. Nicht zuletzt danke ich meiner Familie, die mir die Möglichkeit, meinen eigenen Weg realisieren zu können, gegeben und meine Ausbildung ermöglicht hat.

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Methodik zur Risikobetrachtung umformtechnischer Fertigungsprozesse entwickelt. Dazu wurde die Methode der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse entsprechend angepasst, um eine quantitative Bestimmung des Risikos zu ermöglichen. Die mathematische Beschreibung des Risikobegriffs ermöglicht es auf Daten zurückzugreifen, die über verbreitete Managementwerkzeuge zur Produktivitäts- und Effektivitätsbetrachtung von Produktionsprozessen gewonnen werden können. Diese entwickelte Methode schafft die Möglichkeit, auftretende Risiken von Beginn des Produkterstellungsprozesses bis hin zur Anwendung beim Endkunden abbilden zu können. Um einen Maßstab für die Ergebnisse einer Risikoanalyse der Produkterstellung zu finden, wurde die Methodik um eine produktbezogene Chancen-Gefahren-Betrachtung in Bezug auf die Marktattraktivität erweitert. Um die Chancen eines Produkts unter Berücksichtigung der Bedürfnisse des Endkunden abbilden zu können, wurde eine systematische Strukturierung funktionsrelevanter Qualitätsmerkmale auf Basis technischer Normen und Regelwerke durchgeführt. Durch diese Vorgehensweise kann deutlich gemacht werden, wie sich die Qualitätsanforderungen unterschiedlicher Marktsegmente auf die Ausprägungsform des Produkts auswirken. Die Gefahr, die durch die Fertigung eines Produkts für ein Unternehmen gegeben ist, wurde durch die Nichterfüllung der Funktion in der Endanwendung beschrieben. Für die strukturelle Einbindung des Gefahrenbegriffs in die entwickelte Methodik wird von der Funktionsabweichung beim Endanwender in einem ersten Schritt auf die verursachende Qualitätsabweichung und in einem weiteren Schritt auf ihre Ursache geschlossen.

Um Klarheit über die Einsatzmöglichkeiten des erarbeiteten Modells in Produktionsbetrieben zu schaffen, wird die Abbildung als Informationssystem für qualitätsgestütztes Risikomonitoring dargestellt. Ergänzend zu den bestehenden Ansätzen von Enterprise-Risk-Managementsystemen (ERM) wird eine Umsetzung als kontinuierlich umlaufender Regelkreis über alle Hierarchiestufen eines Unternehmens vorgeschlagen. Dieser Kreislauf wird als unternehmensweiter Plan-Do-Check-Act-Zyklus (PDCA) abgebildet und ermöglicht die Einbindung des Risikobegriffs von strategisch-normativer bis hin zur operativen Ebene.

Als Referenzprozess für die Anwendung der entwickelten Methodik zur Risikobestimmung wurde die kontinuierliche Herstellung längsnahtgeschweißter Edelstahlrohre betrachtet. An Hand des Anwendungsfalles wurden unterschiedliche Technologie-Markt-Kombinationen in Bezug auf Machbarkeit und Anwendungsgrenzen untersucht. Aus diesen Ergebnissen kann dargestellt werden, wie mittels einer strukturierten Risikoanalyse Verbesserungspotentiale des Fertigungsprozesses evaluiert und technische Entwicklungen der Produktionstechnologie beurteilt werden können.

Summary

The primary scope of this work was to develop a method for risk assessment focused on forming operations. For that purpose the failure mode and effects analysis (FMEA) was modified to make a quantitative determination of risks possible. Mathematical description of risk information offers the possibility to use data from usual management tools for efficiency- and productivity-evaluation. Applying the method enables a risk assessment starting in the beginning of manufacturing process leading up to the application of end customer. To set a benchmark for results of risk evaluation focused on the manufacturing process the market attractiveness of produced goods has to be considered. The chances of products on different markets are described by quality attributes based on technical standards which are necessary for customer satisfaction. Chances of a product are always linked to dangers in fact of non-fulfillment of central end product functions. So it is possible to determine out of the malfunction of the end product in a first step the lack in quality and in a second step the associated cause focused on the manufacturing process.

To show the possibilities of application for the risk based tool an implementation in an Enterprise-Risk-Management-System (ERM) is presented. The main difference to other risk based management systems is illustrated by a closed loop cycle from top- to low-level of company organization structure. This circuit demonstrates a companywide Plan-Do-Check-Act-Cycle (PDCA). For practical application of the developed method for risk assessment a manufacturing process of seam welded stainless steel tubes was analyzed. So it was possible to identify interesting market segments for used production technology. Further technical and economical borders could pointed out.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	V
Abkürzungen und Formelzeichen	VIII
Abbildungsverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XVII
1 Einleitung und Motivation	1
2 Zielsetzung und Vorgehensweise	2
3 Stand des Wissens.....	4
3.1 Herstellungsverfahren und Anwendungen von.....	4
Edelstahlrohren	
3.1.1 Herstellungsverfahren	4
3.1.2 Gliederung nach Einsetzbarkeit und Anwendung	6
3.2 Marktwirtschaftliche Zusammenhänge für	14
längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre	
3.2.1 Einfluss des Umformverfahrens	21
3.2.2 Einfluss des Schweißverfahrens	26
3.2.3 Einfluss der Wärmebehandlung	31
3.3 Grundlagen der Produktivitäts- und Effektivitäts-	36
betrachtung von Produktionsprozessen	
3.4 Grundlagen der Risikobetrachtung.....	41
4 Konzeption einer Risikobetrachtung eines Rohrherstellungsprozesses	48
4.1 Chancen- und Gefahrenbetrachtung Produkt.....	48
4.1.1 Produktbezogene Chancenbetrachtung	49
4.1.2 Produktbezogene Gefahrenbetrachtung	56

4.2 Verknüpfung Systemebene Produkt und Prozess.....	58
4.3 Quantitative Risikobetrachtung Prozess	68
5 Realisierung eines Informationssystems für qualitätsgestütztes Risikomonitoring	72
5.1 Methodischer Einsatz als unternehmensweiter	73
PDCA-Zyklus	
5.2 Mehrdimensionale Risikodarstellung als	84
Entscheidungsfindungstool	
6 Erfahrungen	88
6.1 Anwendungsfälle	88
6.1.1 Analyse eines Fertigungsprozesses geschweißter Edelstahlrohre.....	89
6.1.2 Schweißprozess am Spaltrohr	97
6.1.2.1 Technische Zusammenhänge.....	97
6.1.2.1.1 Einfluss Schweißverfahren – Nahtausprägungsform.....	98
6.1.2.1.2 Einfluss Schweißverfahren – Qualitätsmerkmale	102
Schweißnaht	
6.1.2.1.3 Einfluss Schweißverfahren – Qualitätsmerkmale.....	105
Edelstahlrohr	
6.1.2.2 Risikobetrachtung Schweißprozess	107
6.1.2.2.1 Fallbeispiel: Optimierung des Schweißverfahrens	111
an von Rohren zur Fertigung von Airbag-Zündern	
6.1.3 Nahteinwalzung und Wärmebehandlung der Schweißnaht.....	116
6.1.3.1 Technische Zusammenhänge.....	117
6.1.3.1.1 Nahteinwalzung	117
6.1.3.1.2 Wärmebehandlung	119
6.1.3.1.3 Zusammenhang zwischen Kaltverfestigung der	120
Schweißnaht und Wärmebehandlung	

INHALTSVERZEICHNIS

6.1.3.2 Risikobetrachtung Nahteinwulzung und Glühen	121
6.2 Zusammenfassung und Ausblick.....	128
7 Anhang	132
7.1 Struktur Qualitätsabweichungsgruppen	132
7.2 Fehlerkatalog	135
7.2.1 Schweißnahtfehler	135
7.2.2 Glättung nicht in Ordnung.....	137
7.2.3 Anlauffarbe.....	137
7.2.4 Krumme Rohre	138
7.2.5 Oberflächenfehler innen / außen	138
8 Literaturverzeichnis.....	139

Abkürzungen und Formelzeichen

1A	Anteil Gutteile
2A	Anteil Ausschuss
ASTM	American Society for Testing and Materials
Ar	Argon
CPT	Critical Pitting Corrosion Temperature
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DVGW	Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e. V.
EN	Europäische Norm
ERM	Enterprise Risk Management
FAR	Fehlerauftrittsrisiko
FER	Fehlerentdeckungsrisiko
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
GF	Geschäftsführung
H₂	Wasserstoff
H₂O	Wasser
HF	Hochfrequenz
I	Schweißstrom
i.O.	in Ordnung
IH	Instandhaltung
IK	Interkristalline Korrosion
ISO	International Organization for Standardization
KMU	Kleine und Mittlere Unternehmen
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
lfm	Laufmeter
LZ	Legierungszuschlag
MAG	Metall-Aktiv-Gas
MF	Maschinenführer
MIG	Metall-Inert-Gas
MSG	Metall-Schutz-Gas
NEW	Nahteinwalzung
n.i.O.	nicht in Ordnung
OLAP	On-Line-Analytical-Processing
PDCA	Plan-Do-Check-Act
PRE	Pitting Resistance Equivalent
Q	Netto-Streckenenergie
q_{brutto}	Brutto-Streckenenergie
q_{bruttoHF}	Brutto-Streckenenergie HF-Schweißen
q_{bruttoLASER}	Brutto-Streckenenergie Laser-Schweißen

ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN

q _{bruttoWIG}	Brutto-Streckenenergie Wolfram-Inertgasschweißen
R _{aGrundwerkstoff}	Mittenrauwert Grundwerkstoff
R _{aSchweißnaht}	Mittenrauwert Schweißnaht
R _{aW-innen}	Mittenrauwert Schweißnaht Rohrinneinnenseite
R _{p0,2}	0,2%-Dehngrenze
RPZ	Risikoprioritätszahl
RQZ	Risikoquantifizierungszahl
RR	Reklamationsrisiko
t	Rohrwanddicke
TEEP	Total Effective Equipment Productivity
TRW	technisches Regelwerk
U	Lichtbogenspannung
UP	Unterpulver-Schweißen
v	Schweißgeschwindigkeit
VDA	Verband der Automobilindustrie
WD	Wanddicke
WIG	Wolfram-Inertgasschweißen
WIG-PULS	Wolfram-Inertgasschweißen mit geplustem Gleichstrom
WP	Wolfram-Inertgas-Plasmaschweißen
Δs	Wurzelüberhöhung Schweißnaht
η_w	Wärmeübertragungswirkungsgrad
η_{wLASER}	Einkopplungswirkungsgrad Laserstrahlschweißen
η_{wHF}	Verfahrenswirkungsgrad Hochfrequenz-Pressschweißen
η_{wWIG}	Wärmeübertragungswirkungsgrad WIG-Schweißen
#	Stückzahl

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Aufbau der Arbeit.....	3
Abbildung 3.1.1-1: Herstellungsmöglichkeiten nahtloser und geschweißter Stahlrohre	5
Abbildung 3.1.2-1: Vergleich geforderter Grenzabmaße für den Rohraußendurchmesser laut Produktnormen nach DIN ISO 1127.....	10
Abbildung 3.1.2-2: Vergleich geforderter Grenzabmaße für die Rohrwand- dicke laut Produktnormen nach DIN ISO 1127	11
Abbildung 3.1.2-3: Vergleich geforderter Grenzabmaße für den Rohraußendurchmesser laut Anwendungsnormen nach DIN ISO 1127	13
Abbildung 3.1.2-4: Vergleich geforderter Grenzabmaße für den Rohrwand- dicke laut Anwendungsnormen nach DIN ISO 1127.....	13
Abbildung 3.2-1: Globale Entwicklung des Marktvolumens für längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre zwischen 1991 und 2003	15
Abbildung 3-2: Durchschnittliches jährliches Marktwachstum für längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre bezüglich unterschiedlicher Regionen....	16
Abbildung 3.2-3: Marktvolumen längsnahtgeschweißter Edelstahlrohre Stand 2003 nach Regionen gegliedert.....	17
Abbildung 3.2-4: Steigende Qualitätsanforderungen mit zunehmender Entwicklungsreife des Marktes für längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre.....	18
Abbildung 3.2-5: Marktvolumen für längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre gegliedert nach Regionen und Marktsegmenten	19
Abbildung 3.2-6: Das Magische Dreieck der Wettbewerbsfaktoren Kosten, Qualität und Zeit für das Produkt Edelstahlrohr	20
Abbildung 3.2.1-1: Strukturelle Zusammenhänge der primären Blechum- formoperationen zur Herstellung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren.	23

Abbildung 3.2.1-2: Umformschritte für das Rollbiegen eines Spaltrohres	24
Abbildung 3.2.1-3: Kontinuierliche Umformung während des Walzprofilierens durch konturiert ausgebildete Werkzeuge.....	24
Abbildung 3.2.1-4: Rohreinformung mittels Formwalzwerk bestehend aus äußerem und innerem Umformlineal	25
Abbildung 3.2.2-1: Anteil eingesetzter Schweißverfahren zur Herstellung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren in Bezug auf weltweit bestehende Rohrstraßen und produzierte Gesamtmenge	28
Abbildung 3.2.2-2: Grenzen der Schweißverfahren zur Herstellung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren nach Rohrwanddicke und Schweißgeschwindigkeit.....	29
Abbildung 3.2.3-1: Kontinuierliche Fertigung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren vom Band mit angeschlossenen Wärmebehandlungs- und Nacharbeitsoperationen	32
Abbildung 3.2.3-2: Kontinuierliche Fertigung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren vom Band mit integrierter Wärmebehandlung	33
Abbildung 3.2.3-3: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung integrierter und nachgelagerter Wärmebehandlung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren	35
Abbildung 3.3-1: Strukturierte Produktivitätsbetrachtung eines Fertigungsprozesses unter Nutzung der Arbeitszeitkaskade.....	41
Abbildung 3.4-1: Darstellung des mehrdimensionalen Risikobegriffs	42
Abbildung 4.1-1: Strukturierungsmatrix zur Beurteilung von Stärken und Schwächen der verwendeten Fertigungstechnologie im Vergleich zu Chancen und Gefahren neuer Produkte für das Unternehmen.....	48
Abbildung 4.1.1-1: Segmentierung des Kundenstammes eines Rohrherstellers nach den Hauptrohrarten.....	50
Abbildung 4.1.1-2: Gruppierung von Qualitätsmerkmalen für längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre auf Basis der Produktnormen nach Marktsegmenten	52

Abbildung 4.1.1-3: Normenstrukturbaum nach DIN 17457 „Geschweißte kreisförmige Rohre aus austenitischen Stählen für besondere Anforderungen“	53
Abbildung 4.1.1-4: Qualitätsmerkmalsstruktur am Anwendungsbeispiel Fittingrohr.....	55
Abbildung 4.1.2-1: Ableitung der Qualitätsabweichungsstruktur am Anwendungsbeispiel Fittingrohr	57
Abbildung 4.2-1: Technologische Strukturierung des Produkterstellungsprozesses zur Herstellung längsnahtgeschweißter Edelstahlrohre.....	60
Abbildung 4.2-2: Abbildung der Effektivität des Produktionsprozess über eine Kaskadierung der unproduktiven Zeitanteile	65
Abbildung 4.2-3: Verknüpfung der Qualitätsabweichungen am Produkt mit dem Produkterstellungsprozess über die Effektivitätsbetrachtung	66
Abbildung 4.2-4: Überleitung Systemebene Produkt –Systemebene Prozess ...	67
Abbildung 4.2-5: Strukturierte Betrachtung der Prozessfehler auf Systemebene Prozess gegliedert nach Arbeitsschritten	68
Abbildung 4.3-1: Ermittlung der Risikoquantifizierungszahl	70
Abbildung 5.1-1: Modell eines qualitätsgestützten Risikomonitoring auf Basis von aufbauorientiertem und KVP-orientiertem Managementansatz.....	75
Abbildung 5.1-2: Bestimmung des Fehlerauftrittsrisikos im Zuge des Prozessschritts Controlling Produktionsplanung und –steuerung	77
Abbildung 5.1-3: Beurteilung des Fehlerauftrittsrisikos im Sinne einer quantifizierbaren FMEA am Beispiel Fittingrohr	78
Abbildung 5.1-4: Bestimmung des Off-line-Fehlerentdeckungsrisikos im Zuge des Prozessschritts Qualitätssicherung	79
Abbildung 5.1-5: Erhebung von Off-line-entdecketen Fehlern durch die Qualitätssicherung	80

Abbildung 5.1-6: Beurteilung des Off-line-Fehlerentdeckungsrisikos im Sinne einer quantifizierbaren FMEA am Beispiel Fittingrohr.....	80
Abbildung 5.1-7: Bestimmung des Reklamationsrisikos im Zuge des Prozessschritts Reklamationsmanagement.....	81
Abbildung 5.1-8: Erhebung von zum Kunden gelangten Fehlern durch das Reklamationsmanagement	82
Abbildung 5.1-9: Beurteilung des Reklamationsrisikos im Sinne einer quantifizierbaren FMEA am Beispiel Fittingrohr	83
Abbildung 5.2-1: Mehrdimensionale Qualität-Fehler-Risiko-Betrachtung	85
Abbildung 5.2-2: Risikoorientierte Rohrmachbarkeitsmatrix	86
Abbildung 6.1.1-1: Gliederung der Risikoquantifizierungszahl nach Qualitätsabweichungsgruppen der Qualitätsabweichungsstruktur	93
Abbildung 6.1.1-2: Gliederung von Fehlerauftritts-, Off-line-Fehlerentdeckungs- und Reklamationsrisiko nach Qualitätsabweichungsgruppen der Qualitätsabweichungsstruktur.....	94
Abbildung 6.1.1-3: Gliederung der Risikoquantifizierungszahl nach Marktsegmenten	95
Abbildung 6.1.1-4: Gliederung von Fehlerauftritts-, Off-line-Fehlerentdeckungs- und Reklamationsrisiko nach Marktsegmenten	96
Abbildung 6.1.2.1.1-1: Schliffbild der Schweißnaht für ein WIG-geschweißtes Edelstahlrohr (Rohrdurchmesser 70mm / Wanddicke 2mm / 1.4541).....	98
Abbildung 6.1.2.1.1-2: Schliffbild der Schweißnaht für ein Laser-geschweißtes Edelstahlrohr (Rohrdurchmesser 70mm / Wanddicke 2mm / 1.4541).....	98
Abbildung 6.1.2.1.1-3: Schliffbild der Schweißnaht für ein HF-geschweißtes Edelstahlrohr	99

Abbildung 6.1.2.1.1-4: Streckenenergie als Funktion der Rohrwanddicke für unterschiedliche Schweißverfahren	100
Abbildung 6.1.2.1.2-1: Toleranz Grenzwanddicke und zulässige Schweißnahtüberhöhung nach DIN 17455, DIN 17457 und DIN EN 10296-2	103
Abbildung 6.1.2.1.2-2: Wurzelüberhöhung der Schweißnaht für ein WIG-geschweißtes Edelstahlrohr (Rohrdurchmesser 10mm / Wanddicke 1mm / 1.4306).....	104
Abbildung 6.1.2.1.2-3: Wurzelüberhöhung der Schweißnaht für ein Laser-geschweißtes Edelstahlrohr (Rohrdurchmesser 70mm / Wanddicke 2mm / 1.4539)	105
Abbildung 6.1.2.1.3-1: Grenztemperatur der IK-Beständigkeit (CPT) als Funktion des Legierungselementegehalts (PRE)	106
Abbildung 6.1.2.2-1: Fehlerauftrittsrisiko gegliedert nach Qualitätsabweichungen der Qualitätsabweichungsgruppe „Schweißnahtfehler“	108
Abbildung 6.1.2.2-2: Fehlerauftrittsrisiko der Qualitätsabweichung „Schweißaussetzer“ gegliedert nach der Wanddicke für das Marktsegment „Automotive“	109
Abbildung 6.1.2.2-3: Fehlerauftrittsrisiko der Qualitätsabweichung „Schweißaussetzer“ gegliedert nach der Wanddicke für das Marktsegment „Pressfittings“	110
Abbildung 6.1.2.2-4: Fehlerauftrittsrisiko der Qualitätsabweichung „Schweißaussetzer“ gegliedert nach der Streckenenergie für das Marktsegment „Pressfittings“	110
Abbildung 6.1.2.2.1-1: Ausführungsvarianten von Airbag-Zündern in der Automobilindustrie.....	112
Abbildung 6.1.2.2.1-1: Fehlerauftrittsrisiko für die Qualitätsabweichungsstruktur eines Edelstahlrohres zur Fertigung von Airbag-Zündern	113

Abbildung 6.1.2.2.1-3: Vergleich Schweißleistung WIG und WIG-Puls als Funktion der Schweißgeschwindigkeit.....	114
Abbildung 6.1.2.2.1-4: Schweißnahtgeometrie mittels WIG-Gleichstrom geschweißter Rohre	115
Abbildung 6.1.2.2.1-5: Schweißnahtgeometrie mittels WIG-Puls geschweißter Rohre	115
Abbildung 9.3.1-6: Darstellung der Prozessverbesserung durch WIG-Puls über die Parameter Produktionsgeschwindigkeit und Fehlerauftrittsrisiko	116
Abbildung 6.1.3.1.1-1: Funktionsprinzip Nahteinwalzung zyklisch vertikal und horizontal bewegte Oberrolle	118
Abbildung 6.1.3.1.2-1: Funktionsprinzip In-Linie-Kurzzeitglühen	120
Abbildung 6.1.3.2-1: Lösungsglühtemperatur als Funktion der 0,2%-Dehngrenze bei Betrachtung einer Rohrstraße	122
Abbildung 6.1.3.2-2: Produktionsgeschwindigkeit als Funktion der 0,2%-Dehngrenze bei Betrachtung einer Rohrstraße	123
Abbildung 6.1.3.2-3: Fehlerauftrittsrisiko der Qualitätsabweichung „Anlauffarbe“ gegliedert nach der Lösungsglühtemperatur bei Betrachtung einer Rohrstraße	124
Abbildung 6.1.3.2-4: Fehlerauftrittsrisiko der Qualitätsabweichung „Anlauffarbe“ gegliedert nach der 0,2%-Dehngrenze bei Betrachtung einer Rohrstraße	124
Abbildung 6.1.3.2-5: Fehlerauftrittsrisiko der Qualitätsabweichungsgruppe „Glättung nicht in Ordnung“ gegliedert nach der Ausführungsart lt. DIN 17457.....	126
Abbildung 6.1.3.2-6: Fehlerauftrittsrisiko der Qualitätsabweichungsgruppe „Glättung nicht in Ordnung“ gegliedert nach der Ausführungsart lt. DIN 17457 und Marktsegmenten	127
Abbildung 7.2-1: Schweißnahtfehler / Nicht durchgeschweißt / Typ B (automatisierte Prüfeinrichtung)	135

Abbildung 7.2-2: Schweißnahtfehler / Einbrand und Poren (Anlauffarben an der Schweißnahtwurzel) / Typ A (Selbstkontrolle Anlagenbediener)	135
Abbildung 7.2-3: Schweißnahtfehler / Schweißaussetzer (Durchfall des Schmelzbades) / Typ B (automatisierte Prüfeinrichtung).....	135
Abbildung 7.2-4: Schweißnahtfehler / Kantenversatz (geglättete Ausführung) / Typ B (automatisierte Prüfeinrichtung).....	136
Abbildung 7.2-5: Schweißnahtfehler / Danebengeschweiß (Ungenauere Ausrichtung des Schweißspaltes zum Lichtbogen) / Typ B (automatisierte Prüfeinrichtung).....	136
Abbildung 7.2-6: Schweißnahtfehler / Spannungsrisse (Erstarrungsrisse aus Heißrißneigung von Edelstählen und überlagerten Rückstellkräften) / Typ B (automatisierte Prüfeinrichtung)	136
Abbildung 7.2-6: Glättung nicht in Ordnung / Schlechte Glättung (ungleichmäßige Verdrängung des Werkstoffs im Wurzelbereich – „Kante“) / Typ B (automatisierte Prüfeinrichtung).....	137
Abbildung 7.2-7: Glättung nicht in Ordnung / Kratzer im Rohr (Kerbe im Grundwerkstoff durch Relativbewegung des Einwalzdorns) / Typ B (automatisierte Prüfeinrichtung)	137
Abbildung 7.2-8: Anlauffarbe (Kontakt des Glühguts mit atmosphärischen Gasen) / Typ A (Selbstkontrolle Anlagenbediener).....	137
Abbildung 7.2-9: Krumme Rohre / Typ A (Selbstkontrolle Anlagenbediener).....	138
Abbildung 7.2-10: Oberflächenfehler innen / außen / Glüherflecken (Verunreinigungen die im Zuge der Glühbehandlung auf die Rohroberfläche aufgebracht werden) /Typ A (Selbstkontrolle Anlagenbediener)	138

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1.2-1: Produkt- und Anwendungsnormen für die Herstellung und Anwendung von nahtlosen und geschweißten Edelstahlrohren.....	7
Tabelle 3.1.2-2: Grenzabmaße für den Außendurchmesser von nichtrostenden Stahlrohren nach DIN ISO 1127	9
Tabelle 3.1.2-3: Grenzabmaße für die Wanddicke von nichtrostenden Stahlrohren nach DIN ISO 1127	9
Tabelle 4.2-1: Produkt- und Prozessspezifikation für die Fertigung eines geschweißten Edelstahlrohres	62
Tabelle 4.2-2: Technologische Produktionskostengliederung für die Herstellung eines geschweißten Edelstahlrohres	63
Tabelle 6.1.1-1: Ableitung der Qualitätsmerkmals- und Qualitätsabweichungsstruktur Edelstahlrohr	90
Tabelle 6.1.2.1.2-1: Zulässige Schweißnahtüberhöhung nach DIN EN 10296-2, DIN 17457 und DIN 17455.....	102

1 Einleitung und Motivation

Seit Ende der 80er Jahre ist der Bedarf an kaltgewalzten Produkten weltweit stark gestiegen, so nahm die in Deutschland verbrauchte Menge an Kaltprofilen von 1990 bis 1997 von 250.000 auf über 400.000 Tonnen pro Jahr zu [51]. In ähnlicher Weise hat sich auch das Produkt „Geschweißtes kreisförmiges Edelstahlrohr“ entwickelt. Der weltweite Bedarf an geschweißtem Edelstahlrohr ist jedoch heterogen zusammengesetzt in Hinblick auf das verwendete Produktionsverfahren, die Produktqualität und die Verwendung in der Endapplikation. Auch in Hinblick auf die regionale Entwicklung der Märkte ist eine differenzierte Betrachtung nötig. Allgemein sehen sich **Hersteller von Halbzeugen in Europa** und den USA einem **reduzierten relativen Marktwachstum und erhöhtem Preisdruck** ausgesetzt [45].

Um den Produktionsstandort Europa in diesem Spannungsfeld zu sichern, ist es nötig, das **Edelstahlrohr vom reinen Halbzeug näher an die individuellen Anforderungen des Endprodukts** für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche zu bringen, wie beispielsweise die Automobilindustrie, den Anlagenbau oder die Nahrungsmittelindustrie, um somit Fertigungsschritte reduzieren und die Wertschöpfung erhöhen zu können. Diese Entwicklungsnotwendigkeiten haben jedoch zur Folge, dass es zunehmend zu einer Entfernung vom Standardprodukt auf Basis bestehender Normen und technischer Regelwerke kommt. Für die Produkterstellung bedeutet dies zunehmend die **Ausschöpfung verfahrensbedingter Grenzbereiche**.

Diese Entwicklung ist verknüpft mit einem kontinuierlichen Preisdruck durch den Markt, der sich einerseits durch eine natürliche Konkurrenzsituation innerhalb des Marktsegments, aber auch durch eine Substituierbarkeit durch verwandte Produkte und **steigenden Qualitätsanforderungen durch den Kunden** ergibt.

Um sich in diesem Spannungsfeld als Unternehmen erfolgreich positionieren zu können, bedarf es einer strukturierten **Analyse des verwendeten Fertigungsprozesses** zur Herstellung von geschweißten Edelstahlrohren aus dem **Fokus der kundenspezifischen Forderungen** an das Endprodukt, um daraus organisatorische und prozesstechnische Optimierungspotentiale ableiten zu können.

Diese Umorientierung von der Quantität zur Qualität erschwert durch die steigenden Stückkosten den klaren Blick darauf, inwieweit ein **Produkt langfristig zum Unternehmenserfolg** beitragen kann. Die Anwendung einer Methode zur Analyse des Zusammenhangs zwischen Kundenanforderungen und Fertigungstechnologie hat die zentrale Zielsetzung eine eindeutige Antwort auf folgende Frage zu liefern: „**Unter welchem Risiko ist ein Produkt unter Anwendung einer bestimmten Fertigungstechnologie für ein Unternehmen herstellbar?**“.

Die Auseinandersetzung von Unternehmen mit dem Risikobegriff allgemein hat in den vergangenen Jahren stark zugenommen [76]. Angesichts der zunehmenden Verbreitung von **Enterprise-Risk-Managementsystemen (ERM)** scheinen Überlegungen sinnvoll, wie risikogestützte Analysetools für Fertigungsprozesse einzuordnen und anzubinden sind.

2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es eine **Methodik zur Risikobetrachtung umformtechnischer Fertigungsprozesse** zu entwickeln. Dabei soll die Frage beantwortet werden, unter welchem Risiko ein Produkt fertigbar ist und welchen Gesamtnutzen es für das Unternehmen leisten kann.

Alle auftretenden Risiken von Beginn des Produkterstellungsprozesses bis hin zur Anwendung beim Endkunden sollen abgebildet werden können. Um den Nutzen der Herstellung eines Produkts bestimmen zu können, sollen die **Kundenanforderungen an die Qualität des Produkts mit den Herstellungsrisiken verknüpft** werden.

Ausgehend von der Entwicklung eines risikogestützten Analysewerkzeugs soll auch die Möglichkeit einer **systematischen Anwendung in verwendeten Organisationsstrukturen** von Unternehmen untersucht werden. Dabei soll den Besonderheiten Rechnung getragen werden, die sich aus einem umformtechnisch dominierten Kernprozess ergeben. Der zentrale Fokus ist dabei auf die Darstellung eines risikogestützten Informationssystems, welches auf Basis **messbarer und quantifizierbarer Kriterien** Grundlagen für die Entscheidungsfindung auf allen Hierarchiestufen schafft, gerichtet.

Als Beispiel wird eine **kontinuierliche Fertigung längsnahtgeschweißter Edelstahlrohre** verwendet. Es handelt sich dabei um einen stark linearen Produkterstellungsprozess, der sehr modular hinsichtlich Umform-, Füge- und Wärmebehandlungsoperationen aufgebaut ist. Dies ermöglicht eine sehr transparente Analyse, sowohl des Gesamt- als auch der Teilprozesse. Qualitätsabweichungen und Produktfehler können durch automatisierte Prüfeinrichtungen fertigungssynchron detektiert werden. Somit ergibt sich eine entsprechende Datengrundlage, die für die **Anwendung und Validierung der entwickelten Methodik** in dieser Arbeit verwendet werden kann.

Ausgehend von der auf dieser Art durchgeführten Analyse eines Fertigungsprozesses geschweißter Edelstahlrohre sollen relevante **prozesstechnische Verbesserungspotentiale** aufgezeigt und Möglichkeiten zur praktischen Umsetzung dargestellt werden. Folgende Prozessschritte werden dabei näher betrachtet:

- **Schweißprozess zur Verbindung des Spaltes am Schlitzrohr**
- **Einwalzen der Schweißnaht**
- **Wärmebehandlung von Edelstahlrohren**

Die Vorgehensweise bei der Umsetzung dieser Arbeit ist in folgender Abbildung zusammengefasst.

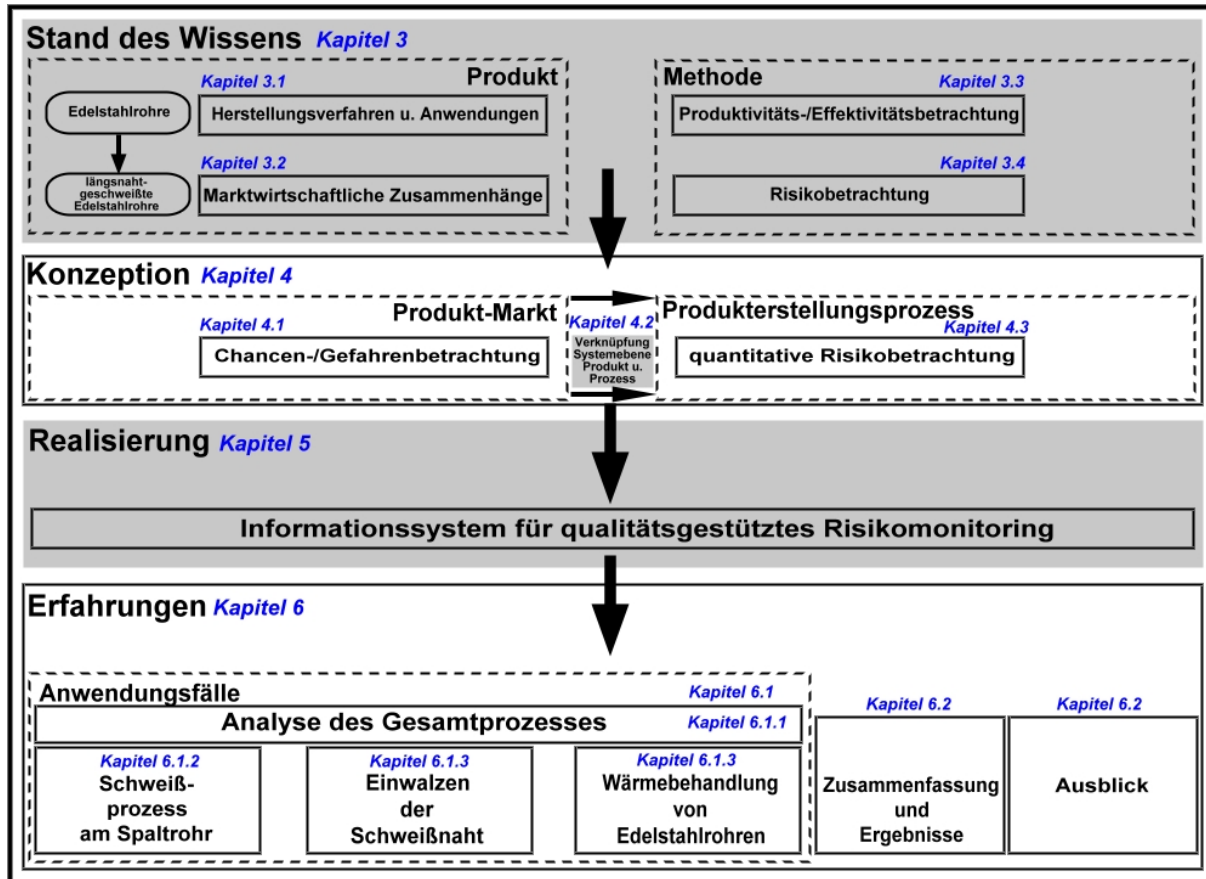


Abbildung 2-1: Aufbau der Arbeit

Um die Zusammenhänge für umformtechnische Fertigungsprozesse ausreichend zu verstehen, wird im ersten Teil von Kapitel 3 sowohl eine technologische als auch eine marktwirtschaftliche Analyse des Produkts Edeldahlrohr durchgeführt. Der Fokus verengt sich dabei zunehmend vom Edeldahlrohr allgemein hin zum längsnahtgeschweißten Edeldahlrohr, das den zentralen Betrachtungsgegenstand der Anwendungsfälle unter Kapitel 6 darstellt. Der zweite Teil von Kapitel 3 widmet sich der Bestimmung des Stands des Wissens in Bezug auf Methoden zur Produktivitäts-/Effektivitätsbetrachtung von Produktionsprozessen und den Möglichkeiten zur Risikobestimmung. Dieses Analysekapitel bildet die Grundlage für die Entwicklung eines Konzepts zur Verknüpfung von Qualität des Produkts mit quantifizierten Risiken des Produkterstellungsprozesses unter Kapitel 4. Die Anwendungsmöglichkeit der konzipierten Methode aus Kapitel 4 durch Einbindung in ein risikoorientiertes Managementsystem wird unter Kapitel 5 dargestellt. Ergebnisse und Erfahrungen aus der Realisierung eines risikogestützten Analysetools zur Betrachtung eines Fertigungsprozesses zur Herstellung längsnahtgeschweißter Edeldahlrohre sind in Kapitel 6 zusammengefasst. Dabei wird in einzelnen Abschnitten sowohl auf die technologischen Besonderheiten und Optimierungspotentiale des Gesamtprozesses als auch relevanter Teilprozesse eingegangen. Diese Arbeit wird durch eine Zusammenfassung der Ergebnisse, durch einen Ausblick auf die Grenzen und Möglichkeiten der betrachteten Methodik sowie deren Anwendung und Weiterentwicklung abgeschlossen.

3 Stand des Wissens

3.1 Herstellungsverfahren und Anwendungen von Edelstahlrohren

3.1.1 Herstellungsverfahren

Die Einteilung der Verfahren zur Herstellung von Edelstahlrohren kann sowohl nach Herstellungsart, als auch nach Ausführungsform erfolgen.

Für die Edelstahlrohrerzeugung kommen sowohl **Warm-** als auch **Kaltumformverfahren**, sowie auch deren Kombination zum Einsatz. Demzufolge gibt es warmgewalzte, warmgepreßte, stranggepreßte, warm gezogene, kalt nachgezogene und kalt nachgewalzte Stahlrohre. Dem Anwender von Edelstahlrohren in der Praxis ist die Detailausprägung des angewendeten Fertigungsverfahrens nicht immer zur Gänze zugänglich. Aus diesem Grund erfolgt hier die Unterscheidung meist nach der Ausführungsform in **nahtlose** und **geschweißte Edelstahlrohre** [18].

Die Formgebung für **nahtlose Edelstahlrohre** setzt sich aus einem mehrstufigen Prozess zusammen, dessen Prozessschritte der Massivumformung zurechenbar sind. Dabei erfolgt prinzipiell immer ein „Lochen“ des Stahlblocks, welcher dann im Weiteren bei Warmumformtemperatur zu einem zylindrischen Hohlkörper gestreckt wird. Eine entsprechende Übersicht über die angewendeten Herstellungsmöglichkeiten sowohl für geschweißte als auch für nahtlose Edelstahlrohre bietet Abbildung 3.1.1-1.

Für die Erzeugung von **geschweißten Edelstahlrohren** werden Einzelbleche oder Blechstreifen in kontinuierlichen oder **diskontinuierlichen Verfahren** zu einem Rohrquerschnitt umgeformt, und die noch losen Blechkanten unter Anwendung des Schweißens als Fügeverfahren fest miteinander verbunden. Diskontinuierliche Verfahren kommen sehr häufig im Bereich der Großrohrherstellung zum Einsatz. Dieser Bereich lässt sich für Außendurchmesser zwischen 400 und 1600 Millimeter und Wanddicken zwischen 6 und 40 Millimeter abgrenzen. Grundsätzlich muss dabei zwischen Verfahren, die für die Einformung der Bleche offene und geschlossene Gesenke in Pressen verwenden und dem Einrollen von Blechen unterschieden werden. Das Einrollen von Blechen zu einzelnen Rohrschüssen, deren Längsnaht mittels Unterpulver-Schweißen oder anderen Schmelzschweißverfahren hergestellt wird, ist für den Bereich hochlegierter Stähle in diesem Dimensionsbereich am weitesten verbreitet.

Im Falle der **kontinuierlichen Fertigung** von geschweißten Edelstahlrohren dient als Vormaterial ein aufgehaspeltes Blechcoil, welches stetig abgezogen, entsprechend zu einem Rohr umgeformt und verschweißt wird. Als relevantes Gliederungskriterium hierbei dient die Orientierung der Schweißnaht. Man unterscheidet demnach längsnaht- und wendelnahgeschweißte Rohre. Zur Erzeugung von **Spiralrohren** wird das Blech in einer Vorrichtung schraubenlinienförmig mit gleichbleibendem Krümmungsradius stetig zu einem Rohr geformt. Durch diese Umformmethode ergibt sich auch die charakteristische Anordnung der Schweißnaht, die in Form einer Schraubenlinie die Rohroberfläche überstreicht. Der Haupteinsatz dieses Verfahrens liegt im Bereich Großrohrherstellung und Herstellung von

Rohren für Haus- und Lüftungstechnik mit einem Durchmesserbereich zwischen 500 und 2500 Millimeter und Rohrwanddicken bis zu 20 Millimeter.

Längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre können auch kontinuierlich aus einem Spaltband erzeugt werden. Dabei wird der Blechstreifen durch formgebundene oder nicht formgebundene Werkzeuge zu einem noch offenen Rohrquerschnitt umgeformt. Für die Einförmung des Bandes können sowohl rollenförmig ausgeprägte Werkzeuge als auch trichterförmig zulaufende Lineale verwendet werden. Die beiden parallel zur Rohrachse ausgerichteten Bandkanten, welche die Begrenzung des noch offenen Spaltrohres bilden, werden unter Anwendung von Press- oder Schmelzschweißverfahren abschließend miteinander verbunden. Wie in Abbildung 3.1.1-1 dargestellt, können sowohl geschweißte als auch nahtlos gefertigte Rohre entsprechenden Kaltweiterverarbeitungsschritten unterzogen werden. Insbesondere dem Kaltziehen und dem Kaltpilgern kommt für den Anwendungsfall hochlegierter Stähle große Bedeutung zu.

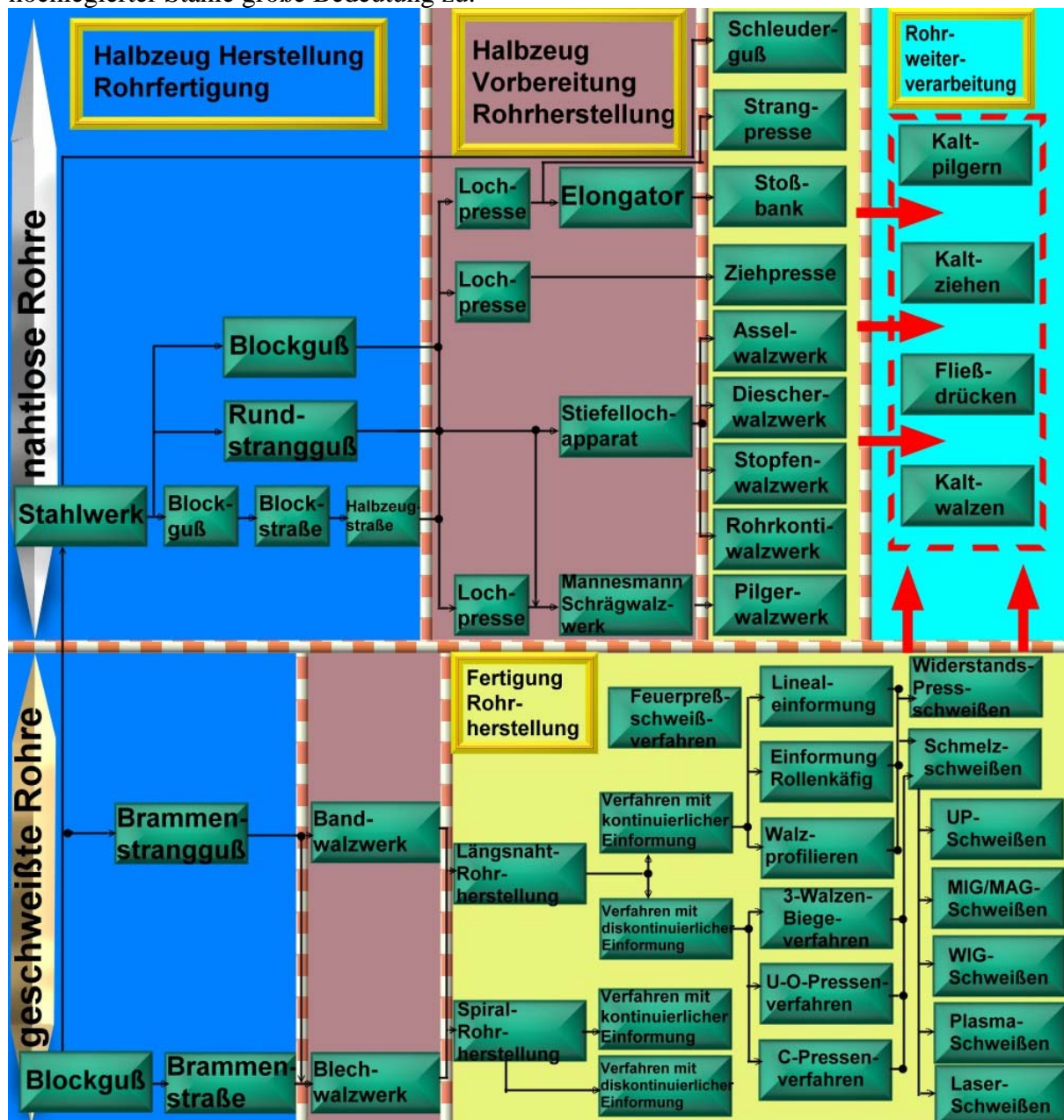


Abbildung 3.1.1-1: Herstellungsmöglichkeiten nahtloser und geschweißter Stahlrohre

3.1.2 Gliederung nach Einsetzbarkeit und Anwendung

Auf Grund der längsgestreckten, zylindrischen Hohlkörperform, welche den Begriff des Rohres ausmacht, können die technischen Anwendungsgebiete in die Gruppen **Leitungs- und Konstruktionselemente** unterteilt werden.

Konstruktionsrohre sind dadurch charakterisiert, dass ihre Auslegung nicht auf Grund der Beanspruchung in Folge eines durchgeleiteten Mediums erfolgt, sondern auf von außen aufgebrachte mechanische Belastungen abstellt. Diese Art von Rohren wird vorwiegend für die Bereiche Stahlbau, insbesondere in Hoch- und Tiefbau, sowie Brücken-, Kranbau und allgemeinen Maschinenbau verwendet. Konstruktive Elemente des Maschinenbaus sind meist einer dynamischen Belastung ausgesetzt, wie beispielsweise Achsen oder Hohlwellen, und werden deshalb zumeist aus allgemeinen Baustählen, Einsatz- oder Vergütungsstählen hergestellt. Für Rohre, die im Stahlbau eingesetzt werden erfolgt die Werkstoffwahl einerseits in Bezug auf die aufgebrachte Beanspruchung und andererseits nach dem Aussehen und der optischen Wirkung für den Einsatz als gestalterisches Element. Während für den Einsatz im Maschinenbau eher nahtlose Rohre bevorzugt werden, kommen für den Bereich des Konstruktionsrohres sowohl geschweißte als auch nahtlose Ausführungen zum Einsatz. Edelstahlrohre mit rundem Querschnitt, meist längsnahtgeschweißt, kommen in diesem Bereich vor allem für architektonische und Design-orientierte Anwendungen, wie Handläufe, Innenausstattung und Möbelbau, Geländer und Schiffsrailings zum Einsatz.

Das **Rohr als Leitungselement** unterscheidet sich von obiger Beschreibung dadurch, dass hier die Beanspruchung durch das im Rohrrinneren durchgeleitete oder das Rohr von außen umströmende Medium verursacht wird. Man verwendet also hier den Hohlquerschnitt des Rohres als Transportweg für Gase, Flüssigkeiten oder rieselförmige Festkörper. Als Anwendungsbeispiele sind hier vor allem Rohre in Rohrleitungssystemen und der Einsatz in Wärmetauschern in Apparate- und Kesselbau zu nennen. Für den Einsatzzweck Rohrleitungssystem können unterschiedlichste Werkstoffe als auch Ausführungsformen zum Einsatz kommen. Betrachtet man nur den Bereich Haustechnik, so lässt sich schon hier die Vielfalt der verwendeten Rohrtypen nachweisen. So kommen beispielsweise im Bereich Lüftungstechnik vorwiegend spiralgeschweißte Rohre aus verzinktem Band zum Einsatz, während für Trinkwasser- und Gasleitungsrohre eher längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre verwendet werden. In Heizungssystemen werden vorwiegend geschweißte Rohre aus niedriglegierten Stählen verbaut, während andere medienführende Leitungen mit geringerer Bedeutung eher in Form von längsnahtgeschweißtem, verzinktem Rohr verwirklicht werden.

Natürlich kommt es in der praktischen Anwendung zu einer **Vermischung der Begriffe Leitungs- und Konstruktionselement**, da durchaus überlagerte Beanspruchungen aus durchgeleitetem Medium und äußerer Krafteinwirkung auf das Rohr erwachsen können. Diese positive Eigenschaft stellt auch einen zentralen Grund für die lange Tradition des technischen Einsatzes von Metallrohren in Maschinen-, Apparate- und Behälterbau dar. Ein typisches Beispiel für die Erfüllung mehrerer anwendungsspezifischer Produktmerkmale ist der Einsatz von Rohren zur Herstellung von Hydraulikzylindern. Das Mantelrohr eines solchen Hydraulikzylinders muss einerseits dem aufgebrachten Innendruck durch das Medium widerstehen und andererseits den über die Kolbenstange und Aufhängung aufgebrachten mechanischen Beanspruchungen standhalten können.

An Hand der zuvor beschriebenen Vielfalt an Einsatzgebieten für Stahlrohre fällt eine Strukturierung rein auf Basis von Produktmerkmalen sehr schwer. Aus diesem Grund soll im Weiteren das Themenfeld auf Rohre mit **kreisförmigem Querschnitt aus austenitischen**

nichtrostenden Stählen eingeschränkt werden und die Ausprägungsformen „längsnahtgeschweißt“ und „nahtlos“ miteinander verglichen werden. Die Festlegung von einheitlichen Qualitätskriterien für das Produkt Edelstahlrohr erfolgt grundsätzlich auf Basis einer gültigen Produktnorm mit zugehörigen Normverweisen zur Ergänzung und Konkretisierung. Die Gültigkeit einer solchen Produktnorm ist soweit gegeben, insofern sie nicht durch Vorgaben aus technischen Regelwerken oder Normen für spezielle Anwendungsfälle eingeschränkt wird. In Tabelle 3.1.2-1 sind **relevante Produktnormen**, die für die Herstellung von **nahtlosen und geschweißten Edelstahlrohren** gelten, und beispielhaft Normen aus zwei unterschiedlichen Anwendungsgebieten zusammengestellt. Die Produktnorm schreibt an Hand technischer Lieferbedingungen unter anderem folgendes vor:

- Hinweise oder Einschränkung der zu verwendenden Herstellverfahren
- Angaben über Ausführungsart und Lieferzustand, wobei insbesondere auf zu verwendendes Vormaterial und Wärmebehandlungszustand eingegangen wird
- Chemische Zusammensetzung des verwendeten Stahls
- Mechanische und technologische Eigenschaften
- Schweißbeignung und Schweißbarkeit
- Weiterverarbeitbarkeit und Wärmebehandlung
- Korrosionsverhalten
- Prüfung und Bescheinigung
- Maße und zulässige Abweichung

Normtyp	Norm	Bezeichnung
Produktnorm	DIN 17455	Geschweißte kreisförmige Rohre aus nichtrostenden Stählen für allgemeine Anforderungen - Technische Lieferbedingungen
Produktnorm	DIN 17456	Nahtlose kreisförmige Rohre aus nichtrostenden Stählen für allgemeine Anforderungen - Technische Lieferbedingungen
Produktnorm	DIN 17457	Geschweißte kreisförmige Rohre aus nichtrostenden Stählen für besondere Anforderungen - Technische Lieferbedingungen
Produktnorm	DIN 17458	Nahtlose kreisförmige Rohre aus nichtrostenden Stählen für besondere Anforderungen - Technische Lieferbedingungen
Produktnorm	DIN EN ISO 1127	Nichtrostende Stahlrohre - Maße, Grenzabmaße und längenbezogene Massen
TRW/Norm Anwendung	DIN 28181	Geschweißte Stahlrohre für Rohrbündel-Wärmetauscher - Maße, Maßabweichungen und Werkstoffe
TRW/Norm Anwendung	DIN 11850	Rohre für Lebensmittel, Chemie und Pharmazie / Rohre aus nichtrostenden Stählen - Maße und Werkstoffe

Tabelle 3.1.2-1: Produkt- und Anwendungsnormen für die Herstellung und Anwendung von nahtlosen und geschweißten Edelstahlrohren [28] [29] [40] [41] [42] [43] [44]

Da die Eigenschaften des Endprodukts Edelstahlrohr maßgeblich durch den verwendeten Ausgangswerkstoff bestimmt werden, kommt es beim Vergleich der technischen Lieferbedingungen von nahtlosen und geschweißten Rohren zu großen Überschneidungen. So kann beispielsweise die Verwendbarkeit der laut Produktnorm vorgegebenen Werkstoffe oder auch das korrosionschemische Verhalten, sowohl für nahtlose als auch für geschweißte Edelstahlrohre als weitestgehend einheitlich betrachtet werden. Der entscheidende

Unterschied zwischen den Ausführungsformen „nahtlos“ und „geschweißt“ ergibt sich aus den erzielbaren Toleranzen in Bezug auf den Rohrquerschnitt. Aus diesem Grund erfolgt eine **Gegenüberstellung der vorgegebenen Toleranzkriterien** entsprechend der Produktnormen und der geforderten Toleranzen laut Anwendungsnormen aus Tabelle 3.1.2-1.

Geschweißte Edelstahlrohre nach DIN 17455

Die Produktnorm DIN 17455 zur Fertigung von geschweißten Edelstahlrohren für allgemeine Anforderungen zielt auf Einsatzzwecke als Konstruktionsrohre, Rohre für Haushaltsinstallationen, Lebensmittelindustrie und dekorative Zwecke ab. Die Abgrenzung erfolgt dabei über die Angabe der zulässigen Toleranzen für Rohrwanddicke und Rohraußendurchmesser. Das Fertigungsverfahren bleibt dem Hersteller überlassen, sowohl in Bezug auf das Umformverfahren als auch in Bezug auf das Schweißverfahren. Im Zuge der praktischen Anwendung dieser Norm, werden Rohre bis zu einem Rohrdurchmesserbereich von 200 Millimeter und einer Wanddicke bis zu 5 Millimeter mittels automatisierten Umformverfahren kontinuierlich vom Band hergestellt. Dabei sind sowohl Press- als auch Schmelzschweißverfahren zulässig. Die Durchschweißung und entsprechende Ausprägung der Schweißnahtwurzel stellen keine normativ festgelegten Kriterien dar, da diese Edelstahlrohre eher in den Bereich Konstruktionselemente einzuordnen sind. Als am weitesten verbreitetes Schweißverfahren für die kontinuierliche Fertigung kann hier das Hochfrequenz-Pressschweißen genannt werden. Das zentrale Auswahlkriterium für das Schweißverfahren stellt in diesem Bereich hauptsächlich die maximal mögliche Schweißgeschwindigkeit dar. Aus diesem Grund sind die klassischen Schmelzschweißverfahren, wie das Wolfram-Inertgasschweißen, auf Grund von Geschwindigkeitsnachteilen eher der Ausnahmefall für nach DIN 17455 gefertigte Edelstahlrohre. Einzig das Laserstrahlschweißen hat sich in den letzten zehn Jahren in diesem Bereich neben dem Hochfrequenz-Pressschweißen etabliert. Für die kontinuierliche Einförmung des Bandes können nach Abbildung 3.1.1-1, sowohl Walzprofilieren, Umformung mittels Rollenkäfig oder Linealeinförmung verwendet werden. Für den Bereich der aus Edelstahl gefertigten Großrohre über 200 Millimeter Durchmesser kommen meist diskontinuierliche Umformverfahren wie Einrollen, U-O- oder C-Preß-Verfahren zum Einsatz. Je nach Wanddicke ist die Anwendung von entsprechend leistungsstarken Schmelzschweißverfahren nötig, wobei Unterpulverschweißen ein sehr weit verbreitetes Verfahren für diesen Anwendungszweck darstellt.

Geschweißte Edelstahlrohre nach DIN 17457

Soll ein längsnahtgeschweißtes Edelstahlrohr vorwiegend für den Bereich Leitungselemente eingesetzt werden, so erfolgt die Fertigung in der Regel auf Basis der Produktnorm DIN 17457. Hierbei wird auch innerhalb des Normenwerks darauf hingewiesen, dass die beschriebenen technischen Lieferbedingungen an die Anforderungen für Rohre im Druckbehälterbau, Apparatebau und Leitungsbau ausgerichtet sind. Auch hier bleibt die Wahl des Umformverfahrens dem Hersteller überlassen und erfolgt ebenfalls wie bei DIN 17455 nach Größe des Rohraußendurchmessers in kontinuierlicher oder diskontinuierlicher Form. Jedoch sind die Band- oder Blechkanten, dieser kontinuierlich oder in Einzelfertigung hergestellten Spaltrohre, zwingend mittels eines Schmelzschweißverfahren miteinander zu verbinden. Der Begriff der Durchschweißung ist fest in die Anforderungen an die

Schweißnahtausführung implementiert um den Anforderungen des Rohres als Leitungselement genüge tragen zu können.

Nahtlose Edelstahlrohre nach DIN 17456 und DIN 17458

In analoger Weise gilt die Unterscheidung der Produktnormen für nahtlose Edelstahlrohre DIN 17456 und DIN 17458. Rohre nach DIN 17456 für allgemeine Anforderungen sind an den Notwendigkeiten für Konstruktions- und Dekorationsaufgaben orientiert. Dementsprechend kommen hier zu einem großen Anteil warmgefertigte Edelstahlrohre zum Einsatz. Kleinere Rohrdimensionen sind jedoch nur mittels Kaltfertigung realisierbar, wobei auch hier ein nahtloses warmgefertigtes Edelstahlrohr als Halbzeug dient. Die Fertigung von nahtlosen Rohren mit besonderen Anforderungen nach DIN 17458 dient vor allem dem Einsatz im Apparate- und Druckbehälterbau.

Maße von Stahlrohren nach DIN ISO 1127

Zur Tolerierung von Außendurchmesser und Wanddicke beziehen sich alle bisher zitierten Produktnormen für geschweißte und nahtlose Edelstahlrohre auf die Norm DIN ISO 1127 zur Klassifizierung von Grenzabmaßen entsprechend Tabelle 3.1.2-2 und Tabelle 3.1.2-3.

Toleranzklasse	Grenzabmaße für den Außendurchmesser
D1	+/-1,5% / mindestens +/-0,75mm
D2	+/-1% / mindestens +/-0,5mm
D3	+/-0,75% / mindestens +/-0,3mm
D4	+/-0,5% / mindestens +/-0,1mm

Tabelle 3.1.2-2: Grenzabmaße für den Außendurchmesser von nichtrostenden Stahlrohren nach DIN ISO 1127 [42]

Toleranzklasse	Grenzabmaße für die Wanddicke
T1	+/-15% / mindestens +/-0,6mm
T2	+/-12,5% / mindestens +/-0,4mm
T3	+/-10% / mindestens +/-0,2mm
T4	+/-7,5% / mindestens +/-0,15mm
T5	+/-5% / mindestens +/-0,1mm

Tabelle 3.1.2-3: Grenzabmaße für die Wanddicke von nichtrostenden Stahlrohren nach DIN ISO 1127 [42]

Vergleich Durchmesser- und Wanddickentoleranzen

Es gibt also mehrere mögliche Kombinationen von Durchmesser- und Wanddickentoleranzen entsprechend der gewählten Toleranzklassen. In folgenden Abbildungen 3.1.2-1 und 3.1.2-2 werden die entsprechend der Produktnormen geforderten Toleranzen auf Basis der Toleranzklassen nach DIN ISO 1127 für einen eingeschränkten Rohrdimensionsbereich betrachtet. Der Rohrdurchmesser wird auf einen Bereich zwischen 6 und 90 Millimeter und die Wanddicke auf einen Maximum von 3,5 Millimeter eingeschränkt. Dabei handelt es sich um einen Abmessungsbereich, in dem sowohl mittels Hochfrequenz-Pressschweißen, Wolfram-Inertgasschweißen oder Laserschweißen, kontinuierlich gefertigte längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre als auch warm- und/oder kaltgefertigte nahtlose

Edelstahlrohre zum Einsatz kommen. Entsprechend sind die normativ und technologisch abgesichert fertigmachen Toleranzbänder dieser Herstellungsverfahren nach den Toleranzklassen entsprechend DIN ISO 1127 gegliedert.

Ab einem bestimmten **Rohraußendurchmesser** wird der obere Grenzwert des Toleranzbandes von der linearen Progression entkoppelt und durch einen konstanten Wert ersetzt, was in Abbildung 3.1.2-1 durch das Abknicken der Linien für die Toleranzklassen D1, D2, D3 und D4 zu erkennen ist. Hochfrequenz-Pressgeschweißte Rohre können im Regelfall nur bis zur Toleranzklasse D2 gefertigt werden.

Aussendurchmessertoleranz Edelstahlrohr DIN EN 1127

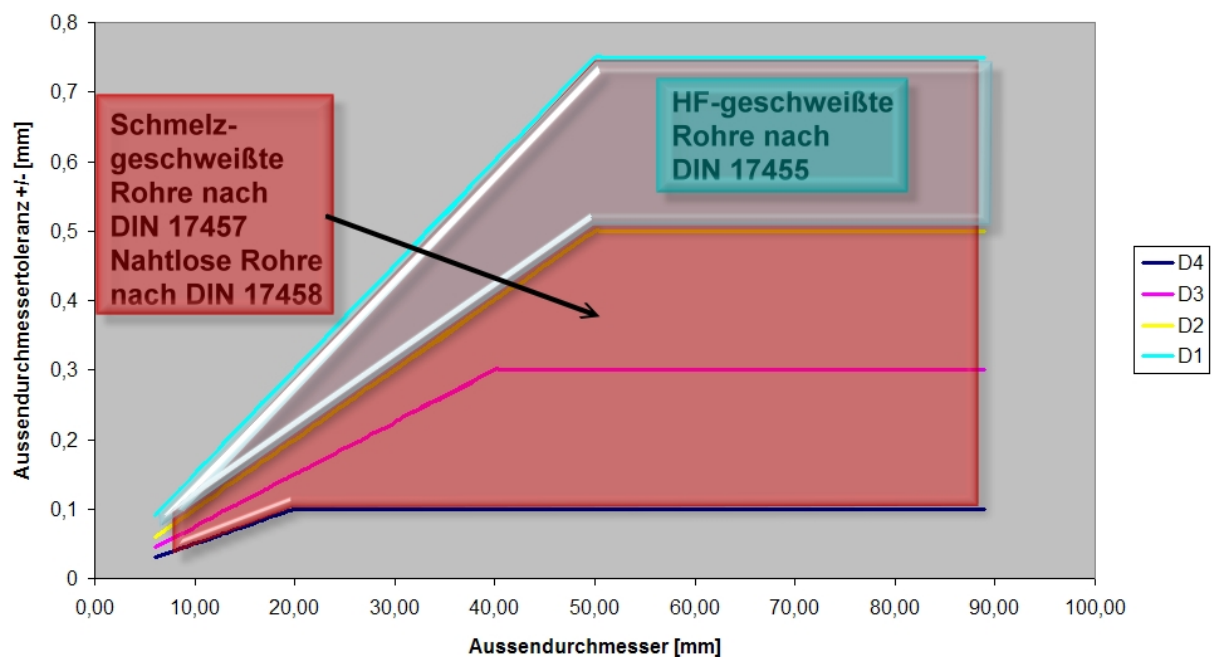


Abbildung 3.1.2-1: Vergleich geforderter Grenzabmaße für den Rohraußendurchmesser laut Produktnormen nach DIN ISO 1127

Um die Anforderungen der höheren Toleranzklassen D3 und D4 genügen zu können, müssen bei geschweißten Rohren Schmelzschweißverfahren eingesetzt werden. Da in der Produktnorm DIN 17457 diese Toleranzklassen als Grenzabmaße beschrieben werden, erfolgt auch die Vorschreibung zur ausschließlichen Anwendung von Schmelzschweißverfahren. Auch für geschweißte Rohre bietet sich die Möglichkeit, einen kontinuierlichen Kalibrierprozess in Bezug auf den Rohraußendurchmesser zu durchlaufen. Aus diesem Grund sind die normativen Forderungen laut DIN 17457 für geschweißte Rohre und DIN 17456 für nahtlose Rohre für den Außendurchmesser ident gehalten.

Bei der **Tolerierung der Rohrwanddicke** spielen zwei Faktoren eine entscheidende Rolle. Einerseits ist die Schweißnaht immer als Ort geometrischer Abweichungen kritisch zu betrachten. Andererseits muss der Fertigungsprozess dahingehend gesehen werden, ob die Möglichkeit besteht einen Kalibrierschritt des Rohrinneidurchmessers und somit der Wanddicke durchzuführen. Hochfrequenz-Pressgeschweißte Rohre zeigen eine sehr ausgeprägte Schweißnaht- und Schweißnahtwurzelüberhöhung, oft auch als Schweißnahtwulst bezeichnet. Dieser Wulst muss sowohl an der Rohraußenoberfläche als auch an der Rohrinneidseite mittels geeigneter Verfahren verringert oder entfernt werden.

Jedoch erlauben diese Verfahren keine Einhaltung von Wanddickentoleranzen, die über T2 hinausgehen.

Grundsätzlich gilt auch für den Einsatz von Schmelzschweißverfahren, dass die Schweißnaht als Ort geometrischer Abweichungen kritisch zu betrachten ist. Jedoch ergibt sich gegenüber dem Pressschweißen ein deutlicher Unterschied, da es auf Grund des fehlenden Stauchdrucks zu keiner Schweißnahtwulstbildung kommt. Der sich bildende Überhang der Schweißnahtwurzel kann entsprechend der Hinweise der Produktnorm DIN 17457 durch Überwalzen oder Hämmern verringert werden, wodurch die Einhaltung der Toleranzklasse T3 erleichtert wird.

Nahtlose Rohre, die nur den Warmfertigungsprozess durchlaufen haben, liegen in einem ähnlichen Toleranzbereich wie geschweißte Rohre für besondere Anforderungen. Durch einen nachgelagerten Kaltfertigungsverfahren, wie er in Abbildung 3.1.1-1 unter dem Begriff Rohrweiterverarbeitung dargestellt ist, kann neben dem Außen- auch der Innendurchmesser exakt kalibriert werden. Somit ist es möglich die Grenzabmaße bis auf Toleranzklasse T4 einzuschränken. Nahtlose Rohre zeigen auch im Vergleich zu nachbearbeiteten geschweißten Rohren einen deutlichen Vorteil in Bezug auf die Gleichmäßigkeit der Wanddickenausprägung auf Grund der fehlenden Schweißnaht.

Wanddickentoleranz Edelstahlrohr DIN EN 1127

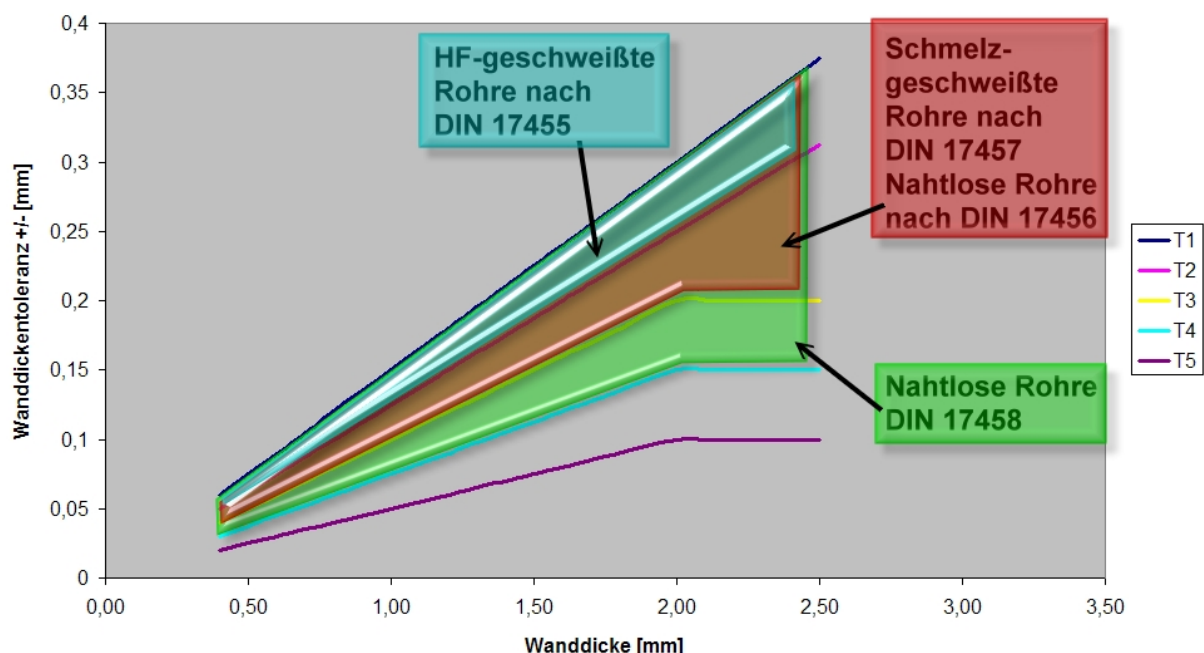


Abbildung 3.1.2-2: Vergleich geforderter Grenzabmaße für die Rohrwalldicke laut Produktnormen nach DIN ISO 1127

In Bereichen wo die Anwendung von Edelstahlrohren große Bedeutung hat oder nur unter besonderen Gesichtspunkten erfolgen kann, werden die Produktnormen durch **Anwendungsnormen** in bestimmten Bereichen ergänzt oder ersetzt. Als relevante Beispiele für Anwendungsnormen in diesem Dimensionsbereich werden die DIN 28181 für die Fertigung von geschweißten Stahlrohren für Rohrbündel-Wärmetauscher und die DIN 11850

für die Anwendung von Rohren für Lebensmittel, Chemie und Pharmazie nach Tabelle 3.1.2-1 im Vergleich zu den Möglichkeiten der Fertigungsverfahren dargestellt.

Edelstahlrohre nach **DIN 28181** für den **Einsatz in Wärmetauschern** und verfahrenstechnischen Anlagen werden in Bezug auf den **Rohraußendurchmesser** für austenitische nichtrostende Stähle in die zwei Toleranzklassen T1 und T2 unterteilt. Die entsprechenden Toleranzfelder sind in Abbildung 3.1.2-3 im Vergleich zur Klassifizierung nach DIN ISO 1127 dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Toleranzklasse T2 sich bis zu einem Außendurchmesser von 38 Millimeter in einem Toleranzfeld bewegt, welches den Toleranzklassen D1 bzw. D2 nach DIN ISO 1127 entspricht. Somit ist der Einsatz einer Fertigungstechnologie unter Anwendung des Hochfrequenz-Pressschweißens bis zu dieser Durchmessergränze noch möglich, wie sich aus dem Vergleich mit Abbildung 3.1.2-1 ergibt. Bei Rohrdurchmessern größer 38 Millimeter müssen auf Grund der engeren Toleranzen Rohre entsprechend der Toleranzklasse D3 nach DIN ISO 1127 verwendet werden, was die Anwendung von Schmelzschweißen nötig macht. Edelstahlrohre der Toleranzklasse T1 nach DIN 28181 können auf Grund der höheren Genauigkeitsansprüche in der Praxis überhaupt nur mittels Wolfram-Inertgasschweißen hergestellt werden, da bereits bei einem Rohraußendurchmesser von 14 Millimetern die Toleranzklasse D2 nach DIN ISO 1127 nicht mehr genügen würde. Darüber liegende Rohrdurchmesser fallen in die Toleranzklasse D3, was sehr einfach und prozesssicher sowohl mittels Laserstrahl- als auch mittels Wolfram-Inertgasschweißen darstellbar ist.

Als weitere Anwendungsnorm berücksichtigt die **DIN 11850**, die besonderen Anforderungen des Einsatzes von Edelstahlrohren in Rohrleitungssystemen der **Lebensmittelindustrie, pharmazeutischen und chemischen Industrie**. Unter anderem erfolgt die Einschränkung des Toleranzbandes für den **Rohraußendurchmesser**, wie in Abbildung 3.1.2-3 dargestellt, bis zu einem Durchmesserwert von 76,1 Millimeter auf die Toleranzklasse D4 nach DIN ISO 1127. Diese Anforderung entsteht vor allem durch den häufigen Einsatz von Armaturen und Verbindungselementen, die mittels Klemm- oder Schneidringssystemen formschlüssig gegen die Rohraußenoberfläche abgedichtet werden. Vergleicht man nun mit Abbildung 3.1.2-1, so wird deutlich, dass Rohre in dieser Qualität nur mehr in nahtloser oder schmelzgeschweißter Form nach DIN 17458 bzw. DIN 17457 hergestellt werden können. Sowohl nahtlose als auch Wolfram-Inertgasgeschweißte Edelstahlrohre werden für diese Anwendung im Zuge einer Kaltfertigung meist durch Ziehprozesse entsprechend nachgearbeitet.

In Abbildung 3.1.2-4 sind die zulässigen Toleranzbänder der **Rohrwanddicke** für die beiden Anwendungsnormen **DIN 28181** und **DIN 11850** im Vergleich zu den Toleranzklassen nach DIN ISO 1127 dargestellt. Im Unterschied zum Rohraußendurchmesser gibt es hier keine Unterteilung in Toleranzklassen für die Wanddicke nach DIN 28181. Bis zu einer maximalen Rohrwanddicke von 1,5 Millimeter könnten Wärmetauscherrohre also theoretisch sowohl mittels Press- als auch Schmelzschweißverfahren hergestellt werden. Jedoch stellt die Tolerierung des Außendurchmessers hier, bei einer gesamtheitlichen Betrachtung, den Grund dafür dar, dass fast ausschließlich Wolfram-Inertgasgeschweißte Rohre in Wärmetauschern verbaut werden.

Edelstahlrohre nach DIN 11850 für die chemische Industrie stellen auf Grund zuvor genannter Gründe auch hier wesentlich höhere Anforderungen an die Tolerierung der Rohrwanddicke. Dies führt, entsprechend Abbildung 3.1.2-4, dazu, dass bis zu einer Wanddicke von 1 Millimeter ausschließlich kaltgefertigte nahtlose Rohre verwendet werden können. Darüber kommen auch in der Praxis sehr häufig schmelzgeschweißte Ausführungsformen zum Einsatz. Somit stellt für diesen Anwendungsfall, die Tolerierung der

Wanddicke, das Entscheidungskriterium für die Auswahl des geeigneten Fertigungsverfahrens dar.

**Vergleich Aussendurchmessertoleranz Edelstahlrohr DIN EN 1127 /
Produktnormen**

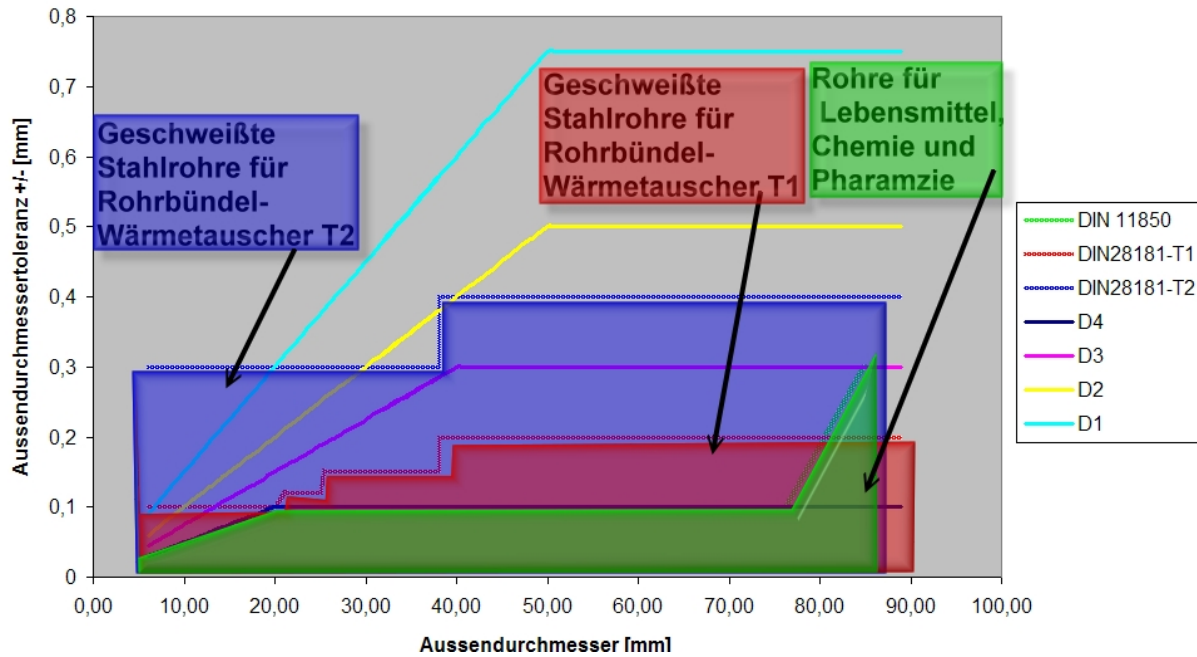


Abbildung 3.1.2-3: Vergleich geforderter Grenzabmaße für den Rohraußendurchmesser laut Anwendungsnormen nach DIN ISO 1127

Wanddickentoleranz Edelstahlrohr DIN EN 1127 / Produktnormen

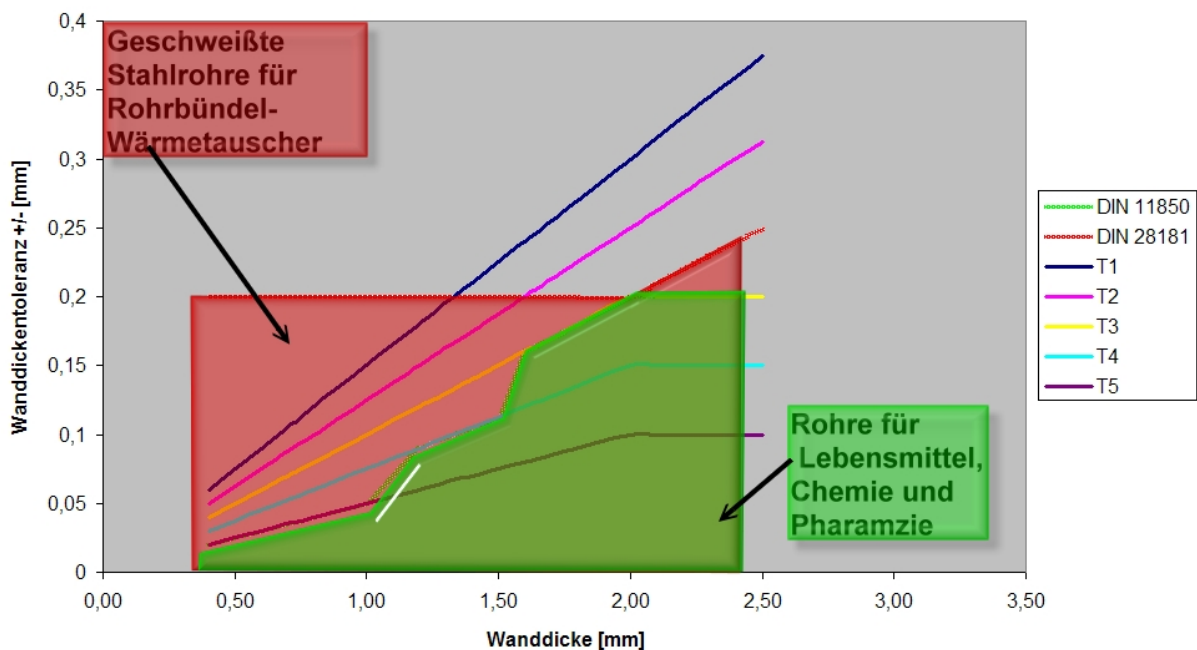


Abbildung 3.1.2-4: Vergleich geforderter Grenzabmaße für den Rohrwalldicke laut Anwendungsnormen nach DIN ISO 112

3.2 Marktwirtschaftliche Zusammenhänge für längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre

Im Vergleich zu Abschnitt 3.1 kommt es im Folgenden zu einer Einengung des Begriffs Edelstahlrohr auf die längsnahtgeschweißte Ausführungsform. Die Fertigung dieser Rohre erfolgt, wie in Tabelle 3.1.2-1 bereits beschrieben, nach den Produktnormen DIN 17455 und DIN 17457. Trotz dieser Einschränkung ergibt sich ein sehr heterogener Markt für längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre mit sehr vielen vielfältigen Anwendungsformen. Die sich auf Grund dieser Situation ergebenden unterschiedlichen Anforderungen an das Produkt bedingt die Notwendigkeit der anforderungsgerechten Wahl der Fertigungstechnologie innerhalb der zulässigen Möglichkeiten, welche von der Produktnorm vorgegeben werden. Natürlich spielen in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit des Fertigungsprozesses auch äußere Einflüsse und Rahmenbedingungen eine entscheidende Rolle.

Es ist am zweckmäßigsten eine **Gliederung des Marktes für längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre** nach dem Einsatzbereich durchzuführen, auch wenn dabei darauf hingewiesen werden muss, dass eine eindeutige Zuordnung nicht in allen Fällen möglich ist. Diese Unterteilung führt zu folgenden Hauptarten:

- Konstruktionsrohre für dekorative Anwendungen und Sichtflächen
(Ornamental Tube)
- Leitungsrohre in der Automobilindustrie für Treibstoff, Abgas, Öl und Kühlmedien
(Exhaust and Liquid Tube)
- Leitungsrohre im Anlagenbau für chemische und petrochemische Anwendungen
(Process Tube and Pipe)
- Wärmetauscherrohre zur Anwendung in aggressiven Medien
(Heat Exchanger Tubing)
- Leitungsrohre in der Lebensmittelindustrie und Medizintechnik
(Hygienic Tube)
- Steuerleitungsrohre für druckbeaufschlagte Anwendungen
(Instrumentation Tubing)

Das prognostizierte **Marktvolumen** für diese Marktsegmente liegt für 2010 bei 3,8 Millionen Tonnen [45]. Trotz der tendenziell steigenden Preise für hochlegierte Stähle, machen Konstruktions- und Dekorationsrohre noch immer das größte Marktsegment mit rund 25 Prozent aus. Steuerleitungsrohre sind eher als eine exotische Anwendung für längsnahtgeschweißte Rohre anzusehen, was ihren geringen Marktanteil von 1 Prozent bedingt. Alle anderen beschriebenen Hauptarten liegen mit Marktanteilen von 5 bis 20 Prozent dazwischen [45].

Seit Ende der 80er Jahre ist der Bedarf an kaltgewalzten Produkten generell weltweit stark gestiegen, so nahm die in Deutschland verbrauchte Menge an Kaltprofilen von 1990 bis 1997 von 250 auf über 400 Tausend Tonnen pro Jahr zu [51].

In ähnlicher Art und Weise hat sich auch das Produkt „Längsnahtgeschweißtes kreisförmiges Edelstahlrohr“, wie in Abbildung 3.2-1 dargestellt, entwickelt. Betrachtet man den Zeitraum vom Jahre 1991 bis zum Jahre 2003 in Bezug auf den **weltweiten Bedarf von geschweißten Edelstahlrohren**, so ist ein deutlicher Anstieg ausgehend von 919 Tausend Tonnen auf 2,6 Millionen Tonnen zu verzeichnen. Dies bedeutet ein durchschnittliches jährliches Wachstum von 9,1 Prozent, das sich jedoch nicht in trivialer Art und Weise begründen lässt. Vielmehr handelt es sich um ein Zusammenwirken von verschiedenen Ursachen, die sowohl in der Erschließung neuer Anwendungsfelder als auch in der Erhöhung der Absatzmengen auf neuen regionalen Märkten zu sehen sind. Ein typisches Beispiel für die Anwendung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren in neuen Einsatzgebieten oder als Substitutionsprodukt stellt der Ersatz von nahtlosen Leitungsrohren für chemische Industrie, Petrochemie, Lebensmittelindustrie und Medizintechnik dar. Diese Entwicklung vollzog sich seit Mitte der 80er Jahre und hat mit Ende der 90er Jahre ein Sättigungsniveau erreicht, sodass kein merklicher Zuwachs an Marktanteilen mehr hieraus generiert werden kann. Der Zugewinn an Absatzmengen bezüglich regionaler Märkte oder Länder ist sehr eng mit deren volkswirtschaftlicher Entwicklung zu sehen. So ist der gesamte asiatische Raum als wirtschaftlicher Wachstumsmotor, auch für die Rohrindustrie, zu sehen [45].

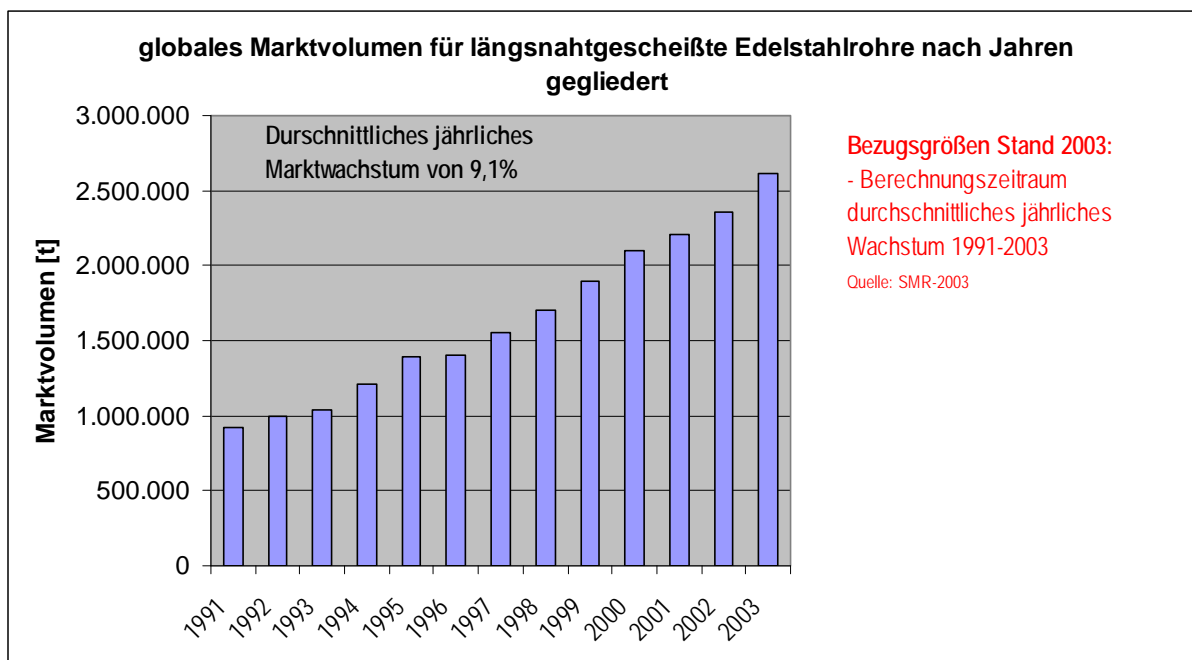


Abbildung 3.2-1: Globale Entwicklung des Marktvolumens für längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre zwischen 1991 und 2003 [45]

Betrachtet man in Abbildung 3.2-2 die **regionale Entwicklung des Marktwachstums** für längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre differenziert, so wird deutlich, dass zwischen traditionellen Märkten mit mäßigem Wachstum und neuen Märkten mit starkem Wachstum unterschieden werden muss. Das Wachstum in Europa und Amerika beträgt zwischen 1991 und 2003 durchschnittlich 6,9 bzw. 6,1 Prozent pro Jahr [45]. Dieser Wert liegt deutlich unter jenem asiatischer Länder von 13,4 Prozent und macht den Unterschied in der bestehenden Dynamik deutlich [45]. Auch unter dem Sammelbegriff „Andere“ zusammengefasste Länder, wie Südafrika oder Australien, haben deutlich höhere Wachstumsraten zu verzeichnen. Jedoch ist hier die Vergleichbarkeit etwas schwierig, da das Marktvolumen absolut gesehen,

laut Abbildung 3.2-3, deutlich unter jenem der traditionellen Märkte zu liegen kommt. Neue Märkte mit geringem Reifegrad haben den Vorteil, dass große Geschäftsfelder unter geringem Aufwand akquiriert werden können, während in traditionellen Märkten die Vergrößerung des Marktanteils hauptsächlich den Themenbereichen Produktinnovation und Substitution bestehender Produkte zugeschrieben werden muss.

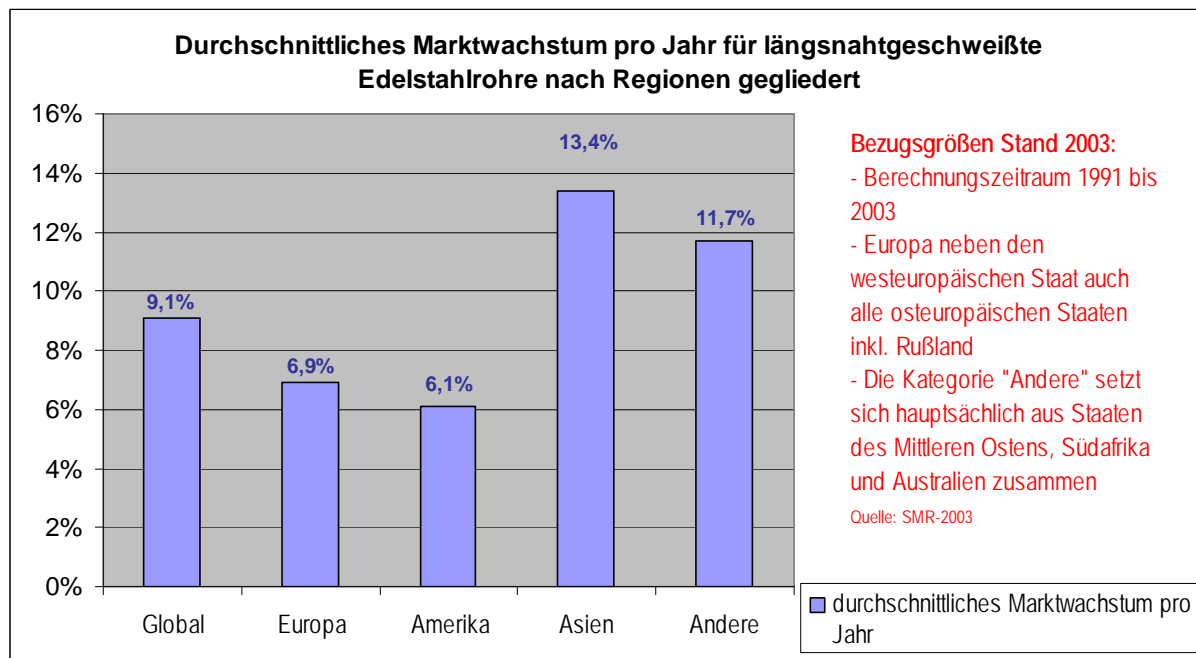


Abbildung 3.2-2: Durchschnittliches jährliches Marktwachstum für längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre bezüglich unterschiedlicher Regionen [45]

Abbildung 3.2-3 zeigt die **nachgefragten Mengen** an geschweißtem Edelstahlrohr des Jahres 2003 für die **Regionen Amerika, Europa und Asien**. Der asiatische Raum weist also nicht nur das stärkste Marktwachstum, sondern auch bereits das größte Marktvolumen mit 1,16 Millionen Tonnen, auf [45]. Europa und Amerika liegen mittlerweile deutlich dahinter mit Werten von 790 und 549 Tausend Tonnen [45]. Andere Staaten, wie Süd Afrika, Australien und Länder des Nahen Ostens, sind in Bezug auf das globale Marktvolumen annähernd vernachlässigbar. Trotz Berücksichtigung der Staaten des ehemaligen Ost-Blocks sind Deutschland, Italien und Frankreich noch immer als größte Verbraucher von Edelstahlrohren in Europa anzusehen. Der amerikanische Markt wird nach wie vor durch den nordamerikanischen Markt dominiert. Die Vereinigten Staaten und Kanada bilden hier ein Marktvolumen von über 500 Tausend Tonnen [45]. Als durchaus bedeutsamer Marktteilnehmer für den amerikanischen Raum ist mittlerweile Mexiko zu sehen, vor allem auf Grund der hohen Wachstumsraten von über 15 Prozent. Auf Grund des generellen wirtschaftlichen Aufschwungs Chinas in den letzten Jahren, ist auch für den Bereich Edelstahlrohre der größte Markt mit 544 Tausend Tonnen entstanden. Gefolgt von Japan und Südkorea werden in China rund 50 Prozent der Rohre im gesamtasiatischen Raum abgesetzt [45].

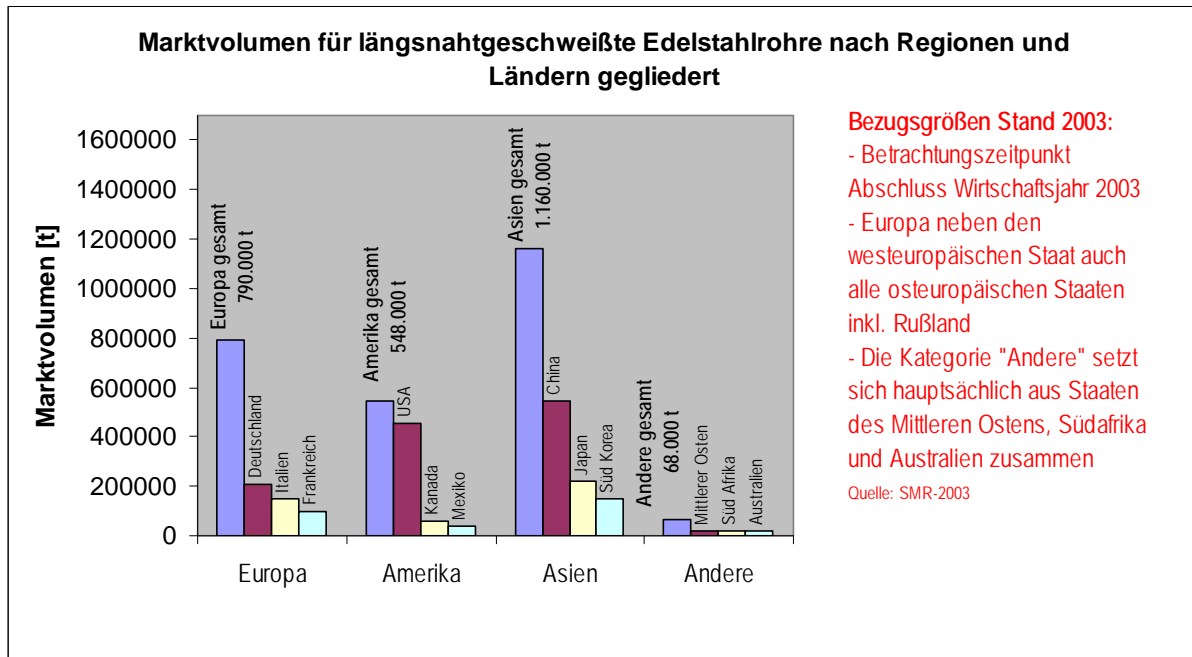


Abbildung 3.2-3: Marktvolumen längsnahtgeschweißter Edelstahlrohre Stand 2003 nach Regionen gegliedert [45]

An Hand der anteilmäßigen Bedeutung der Hauptrohrarten für die Marktzusammensetzung einzelner Regionen, lassen sich die zuvor geprägten Begriffe „**traditionelle Märkte**“ und „**neue Märkte**“ bestätigen. Der Anteil an längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren mit geringeren Qualitätsanforderungen ist in neuen Märkten traditionell höher als in traditionellen Märkten. Die in Start-Up-Phasen eingesetzten Basistechnologien der Rohrfertigung zielen vorwiegend auf die Herstellung von Standardgütern, wie Konstruktionsrohr, Rohr für Abgas führende Leitungen im Automobilbau oder Leitungsrohr im Apparatebau ab.

Gerade in **Marktentwicklungsphasen** werden WIG-Schweißanlagen zur Fertigung von weniger qualitativen Rohren eingesetzt. Bei entsprechendem Marktvolumen werden diese Anlagen mit zunehmender Reife des Marktes durch HF-Schweißanlagen mit wesentlich höherem Output ersetzt. Die normative Beschreibung längsnahtgeschweißter Rohre für diesen Anwendungsbereich erfolgt, laut Tabelle 3.1.2-1, nach DIN 17455. Die Marktanteile von Rohren mit höheren Qualitätsanforderungen liegen in Regionen mit geringerer Tradition in der Rohrfertigung bei kleineren Bereichen. Mit **steigender Marktreife** nimmt ihr Anteil tendenziell zu. Typische Beispiele für höher qualitative Rohre sind Wärmetauscherrohre, Leitungsrohre in der Lebensmittelindustrie und Medizintechnik, Fluid führende Leitungen im Automobilbau und Steuerleitungsrohre für druckbeaufschlagte Anwendungen. Hierfür erfolgt die Fertigung, entsprechend Tabelle 3.1.2-1, nach der Produktnorm DIN 17457, wodurch der Einsatz von WIG- oder Laserschweißen notwendig wird. Zumeist beginnt mit der Entwicklung des Marktes und der damit verbundenen **Abwendung von der Quantität hin zur Qualität**, eine entsprechende Adaption der WIG-Schweißanlagen an die geänderten Anforderungen. Wie in Abbildung 3.2-4 dargestellt, bewegt man sich somit zunehmend auch in Randbereichen des Anwendungsspektrums nahtloser Edelstahlrohre nach DIN 17458. Für diese Überlappungsfälle erfolgt die Erweiterung des Marktvolumens über Substitutionsvorgänge.

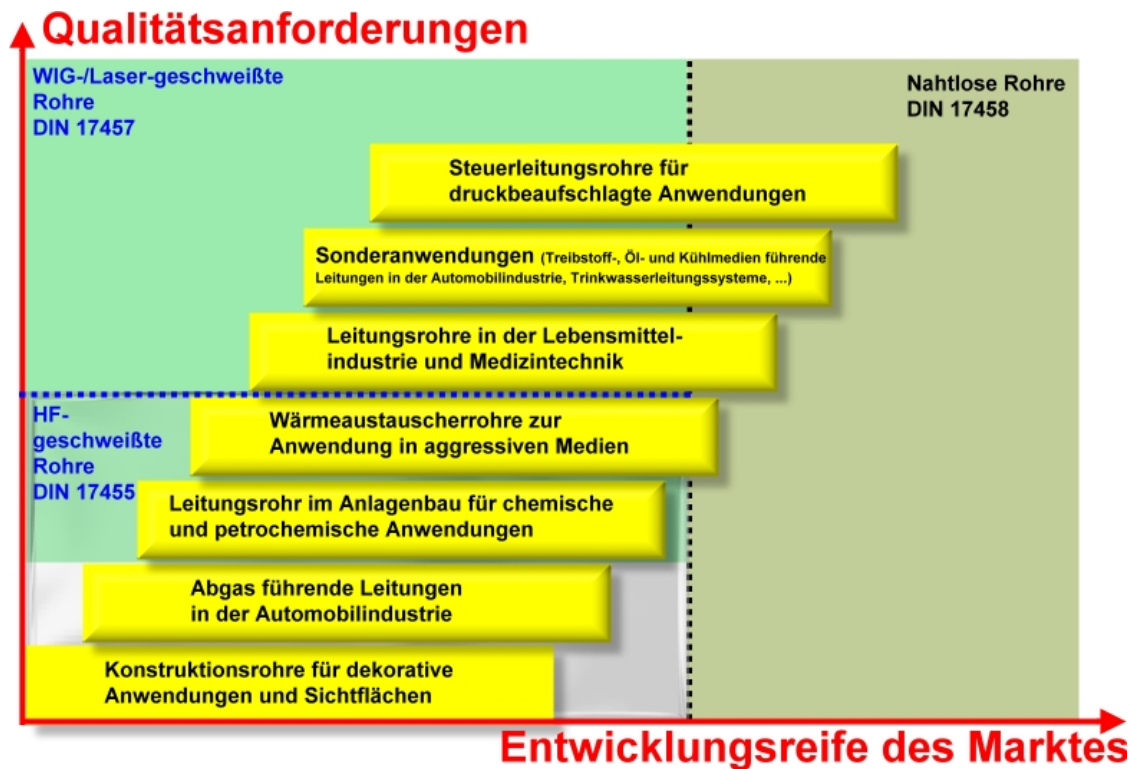


Abbildung 3.2-4: Steigende Qualitätsanforderungen mit zunehmender Entwicklungsreife des Marktes für längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre

Vergleicht man nun das in Abbildung 3.2-4 skizzierte Modell der **kontinuierlichen Marktentwicklung über der Zeitachse** mit der Marktzusammensetzung nach Segmenten für die Regionen Europa, Amerika und Asien, so kann die Entwicklungsreife des Marktes eingeschätzt werden. In Abbildung 3.2-5 sind dementsprechend die Marktsegmente nach einzelnen Regionen gegliedert und anteilmäßig in Bezug auf das Marktvolumen dargestellt. Der Markt für längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre in Asien im Rückenwind des konjunkturellen Aufschwungs Chinas zeigt typische Merkmale eines neuen Marktes mit hoher Dynamik. Der größte Marktanteil, nämlich jener von **Konstruktionsrohren**, liegt bei 52 Prozent [45]. Asien hat für dieses Segment die Einstiegsphase bereits überschritten und die Fertigung von Konstruktionsrohr, auch auf Grund der großen benötigten Mengen, auf HF-Schweißen umgestellt. Der globale Mittelwert an HF-Schweißanlagen in Bezug auf die Anzahl verwendeter Rohrstraßen liegt, laut Abbildung 3.2.2-1, bei 4 Prozent, und wird von den asiatischen Ländern mit 4,2 Prozent bereits leicht übertroffen. In den traditionellen Märkten Europa und Amerika liegt der Anteil von Konstruktionsrohr mit 13 und 12 Prozent deutlich darunter [45].

Die Marktsegmente **abgasführende Leitungen und Leitungsrohre im Apparatebau** bieten einen großen Überschneidungsbereich für HF- und WIG-geschweißte Rohre. Wobei die Anwendungshäufigkeit des WIG-Schweißens mit steigenden Qualitätsanforderungen zunimmt. Die Anteilssumme dieser beiden Marktsegmente soll als Indikator für die Entwicklung von Fertigungsmöglichkeiten für Rohre **mittlerer Qualitätsanforderungen** dienen. Für die Region Asien liegt dieser Anteil bei 34 Prozent [45]. Am amerikanischen Markt liegt der Anteil von Rohren für abgasführenden Leitungen und Leitungsrohren für den Apparatebau bei 74 Prozent und in Europa bei 47 Prozent [45]. Dies deutet darauf hin, dass im amerikanischen Raum von vielen Unternehmen die Strategie verfolgt wurde, Rohre, die mittels Standardtechnologie fertigbar sind, in größerer Quantität herzustellen. Die Herstellung

von Rohren für diese Anwendungsbereiche ist auf Grund des mangelnden Know-hows und der nicht adäquaten Produktionsmittel im asiatischen Raum in größerer Menge noch nicht möglich. Der Marktanteil von 47 Prozent liegt in Europa deshalb so deutlich unter jenem Amerikas, da hier bereits eine Umorientierung in Richtung steigender Qualität zur Gewinnung weiterer Marktnischen Ende der 90er Jahre stattgefunden hat. Wird die Summe der Marktanteile von **Steuerleitungsrohren** für druckbeaufschlagte Anwendungen, **Wärmetauscherrohre**, Leitungsrohre für **Lebensmittelindustrie und Medizintechnik** und Sonderanwendungen als Maßstab für die Fertigungsmöglichkeiten von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren mit **höchster Präzision** angewendet, so kann bestätigt werden, dass hier die Entwicklungen in Europa am weitesten fortgeschritten sind. Dieser Anteil an Präzisionsrohren liegt in Europa am höchsten mit 41 Prozent, gefolgt von Amerika und Asien mit 14 Prozent.

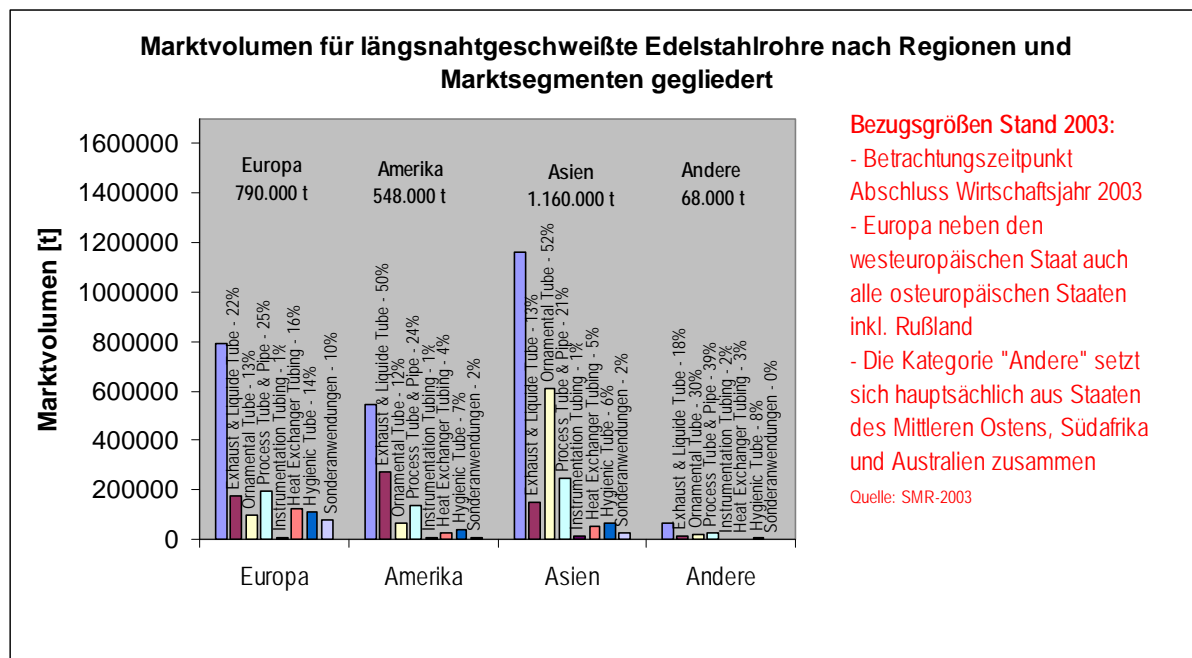


Abbildung 3.2-5: Marktvolumen für längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre gegliedert nach Regionen und Marktsegmenten [45]

Um die Zielorientierung der verschiedenen regionalen Märkte strukturierter betrachten zu können, soll dies im Spannungsfeld der Wettbewerbsfaktoren Kosten, Zeit und Qualität erfolgen. Dieses Spannungsfeld, in dem sich alle marktwirtschaftlich operierenden Unternehmen bewegen, wird als „**Magisches Dreieck**“ bezeichnet [52].

Wie in Abbildung 3.2-6 dargestellt, gilt für ein Unternehmen, sich innerhalb des Magischen Dreiecks günstig zu positionieren, wobei die Randbedingungen durch den Markt vorgegeben werden. Unter dem Begriff Kosten sollen hier die Produktherstellkosten bezogen auf eine Tonne Edelstahlrohr verstanden werden. Der Begriff Qualität stellt ein Maß für die prozesssicher herstellbaren Toleranzanforderungen dar. Nach Abbildung 3.2-4 kann zur indirekten Beschreibung der fertigen Toleranzen entsprechend der Produktnormen auch die Zusammensetzung der Marktsegmente eingesetzt werden. Der Zeitbegriff dient zur Abbildung der Flexibilität eines Industriezweigs und beantwortet somit die Frage, wie schnell auf neue Produkthanforderungen reagiert und diese bis zur Marktreife umgesetzt werden können.

Vergleicht man die **Kostenniveaus in Europa, Amerika und Asien** für die Herstellung eines längsnahtgeschweißten Konstruktionsrohres mit einem Laufmetergewicht von 1,2 Kilogramm an Hand der Fertigungsstandorte Deutschland, USA und China, so wird der wirtschaftliche Nachteil der traditionellen Märkte deutlich. Die Fertigungskosten für dieses Produkt liegen in China um 26 Prozent unter dem europäischen und um 21 Prozent unter dem amerikanischen Niveau. Dieser Unterschied ergibt sich vor allem durch die wesentlich niedrigeren Personal-, Energie- und Investitionskosten, sowie durch die geringe Abgabenquote im asiatischen Raum [45].

Viele Hersteller in Europa haben auf diese Entwicklung bereits seit Anfang der 90er Jahre reagiert und sich entsprechend Abbildung 3.2-5 in Richtung neuer Marktsegmente orientiert. Typische Indikatoren dafür sind ein Anteil an Konstruktionsrohren kleiner 25 Prozent und ein Gesamtanteil vorwiegend HF-geschweißter Rohre kleiner 75 Prozent [45]. Regionale Märkte, die diese beiden Kriterien erfüllen, können als **stark qualitätsorientiert** eingestuft werden. Der amerikanische Markt hat sich noch nicht so stark in diese Richtung entwickelt, was daran zu erkennen ist, dass der Anteil von Konstruktionsrohren zwar unter 25 Prozent zu liegen kommt, HF-geschweißte und WIG-geschweißte Rohre mit niedriger Qualität noch immer mehr als 75 Prozent Marktanteil haben [45]. Dieser Markt ist als **durchschnittlich qualitätsorientiert** einzustufen. Asien, welches keines der beiden Kriterien erfüllt, wird als **wenig qualitätsorientiert** bezeichnet.

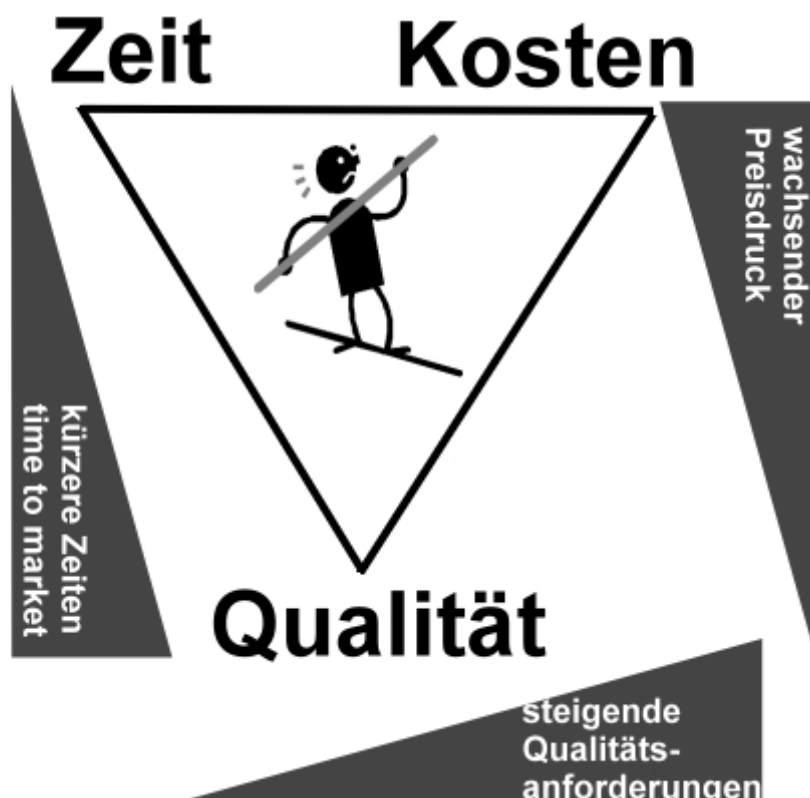


Abbildung 3.2-6: Das Magische Dreieck der Wettbewerbsfaktoren Kosten, Qualität und Zeit für das Produkt Edelstahlrohr [53]

Als **Maßstab** für die Fähigkeit mit ausreichender Flexibilität auf äußere Einflüsse reagieren zu können, und somit indirekt für die **Produktentwicklungs- und Markteinführungszeiten**, dient der **Anteil von Rohren für Sonderanwendungen**. Dieses Marktsegment beinhaltet traditionell einen hohen Anteil an Anwendungen für die Automobilindustrie, wodurch kurze time-to-market-Zeiträume nötig sind um konkurrenzfähig sein zu können. In Europa liegt der Anteil von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren für Sonderanwendungen bei 10 Prozent, in Asien und Amerika mit 2 Prozent deutlich darunter [45]. Märkte mit Anteilen über 8 Prozent können als **innovativ und flexibel** bezeichnet werden. Liegt der Indikatorwert darunter, so kann von „an **Standardprodukten orientierten und statischen Märkten**“ gesprochen werden.

Betrachtet man den Unterschied der notwendigen Produktionsmenge, um den Bedarf der unterschiedlichen Marktsegmente decken zu können, so wird deutlich, dass nicht nur auf Grund qualitativer Gesichtspunkte, sondern auch aus der benötigten Quantität **unterschiedliche Prozesstechnologien** verwendet werden müssen. Da die Herstellung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren eine Verkettung von vielen Fertigungsschritten darstellt, ist es möglich auch in Bezug auf die Technologie modular vorzugehen. Die Fertigung eines geschweißten Rohres setzt sich immer zumindest aus folgenden **Hauptoperationen** zusammen:

- Biegeumformen an Blech oder Band
- Längsnahtschweißen
- Wärmebehandlung (optional)

Gegliedert nach diesen Fertigungsoperationen erfolgt nun ein Überblick über die technischen Möglichkeiten, welche sich bieten, um Produkte entsprechend der qualitativen und quantitativen Anforderungen der einzelnen Hauptrohrarten und deren Marktsegmente herstellen zu können.

3.2.1 Einfluss des Umformverfahrens

Zur Herstellung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren können nach Abbildung 3.1.1-1 unterschiedlichste Umformtechniken aus dem Bereich der Blechumformung verwendet werden, um einen geschlitzten, zylindrischen Hohlkörper zu erstellen, der danach einem Schweißprozess zugeführt wird um die Mantelfläche zu schließen. Ein solcher Umformprozess ist von zahlreichen Prozessparametern abhängig, die sich aus den **Haupteinflussgrößen Material (Ausgangswerkstoff), Werkzeug (Umformwerkzeug) und Maschine (Umformmaschine)**, sowie deren Interaktionen ableiten lassen. Da das Ergebnis dieser Umformung zumindest mittel-, wenn nicht sogar unmittelbar, die Eigenschaften des Endprodukts beeinflusst, kann aus diesem Fokus, die Einsetzbarkeit unterschiedlicher Technologieformen und Methoden zur Herstellung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren für verschiedene Anwendungsformen und Marktsegmente abgegrenzt werden. In Abbildung 3.2.1-1 ist ausgehend von den Haupteinflussfaktoren, deren Zusammenwirken in Bezug auf die Blechumformung und die Auswirkung auf das Umformergebnis dargestellt. Dabei wird zwischen **direkten und indirekten**

Zusammenhängen unterschieden. Betrachtet man z.B. die Haupteinflussgröße „Ausgangswerkstoff“, so stellen die **mechanischen Eigenschaften** des verwendeten Bleches oder Bandes einen direkten **Konnex** zu dessen Umformverhalten dar. Inwieweit eine Änderung der mechanischen Eigenschaften des Ausgangswerkstoffs für die Ausprägung der Prozessparameter eine Rolle spielt, kann nur durch Erweiterung der Betrachtung über die nächste Systemgrenze hin zu den verwendeten Werkzeugen erfolgen. Diese Betrachtungsweise wird in Abbildung 3.2.1-1 durch die Begriffe „Schnittstelle Werkstoff-Werkzeug“ und „Schnittstelle Werkzeug-Maschine“ versinnbildlicht. Typische Fragestellungen, die sich in diesen Schnittstellenbereichen ergeben, sind beispielsweise, welche Reibungsbedingungen sich zwischen Werkzeug und Werkstück ausbilden oder welche Genauigkeitseinbußen man durch die sich ergebende Toleranzkette zwischen Blech – Werkzeug – Umformmaschine in Kauf nehmen muss.

Da es sich bei Rohrherstellungsprozessen für längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre zwangsläufig um mehrstufige Fertigungsfolgen handelt, können Eigenschaftsmerkmale, die im ersten Prozessschritt der Einformung erzeugt werden, bis zur Fertigstellung des Endprodukts erhalten bleiben. Hierbei handelt es sich dann um einen direkten Zusammenhang zwischen Umformoperation und Eigenschaften des Fertigrohres. Nicht alle erzeugten Eigenschaftsmerkmale der primären Blechumformung haben direkte Relevanz für das Fertigrohr. Ihre Bedeutung liegt oft hauptsächlich im Einfluss auf die **Prozessstabilität** nachfolgender Fertigungsoperationen, wie dem Schweißen. Zur Berücksichtigung dieser **indirekten Zusammenhänge** wird in Abbildung 3.2.1-1 als Zwischenschritt das Ergebnis der Blechumformung, das eingeformte Schlitzrohr, verwendet. Sowohl geometrische Abweichungen, wie Versatz der Bandkanten oder ungünstige Spannungszustände, die zu erhöhter Rückfederung des offenen Querschnitts führen, können als direkte Einflüsse auf den nachgelagerten Schweißprozess genannt werden.

Das grundlegende Unterscheidungskriterium für das verwendete Umformverfahren ist die Werkzeugbewegung. Dabei werden nach DIN 8586 Verfahren mit **linearem oder rotierendem Werkzeug** unterschieden [46].

Verfahren mit **linearer Werkzeugbewegung** sind zumeist **diskontinuierliche Vorgänge**, wie in Abbildung 3.1.1-1 dargestellt, wobei die Umformung von Blechen mittels Gesenken auf Pressen durchgeführt wird. Das Einrollen von Blechen zu Rohren stellt ein **diskontinuierliches Umformverfahren mit rotierendem Werkzeug** dar. Die Einzelfertigung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren wird hauptsächlich zur Erzeugung von Leitungsrohren für den Anlagenbau ab einem Durchmesserbereich von 600mm verwendet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass zur kontinuierlichen Umformung Bänder benötigt werden, welche jedoch nur bis zu einer Bandbreite von 2000 Millimeter erhältlich sind. Für viele Werkstoffe ist die maximal mögliche Bandbreite sogar auf 1250 Millimeter beschränkt, was den Bereich für kontinuierlich eingeformte Rohre auf einen maximalen Durchmesser von 350mm einschränkt. Diskontinuierliche Fertigungsverfahren bieten für diesen Bereich der Großrohre den Vorteil geringerer Losgrößen in Bezug auf die produzierten Laufmeter. Wanddicken bis zu 4mm können mittels Einrollen verarbeitet werden. Bei höheren Wanddicken zwischen 4 und 15mm kommen U-O- und C-Pressenverfahren zum Einsatz.

In der Regel liegen die üblichen Abmessungen für die anderen Hauptrohrarten unter diesen kritischen Grenzabmaßen für die **kontinuierliche Umformung** vom Band. Zur Herstellung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren in diesem Dimensionsbereich wird das Band durch Biegeoperationen mit **rotierend bewegten Werkzeugen** profiliert. Dieser Vorgang wird als **Rollbiegen** bezeichnet und bietet folgende Vorteile

- stetiger Prozess
- hoher Automatisierungsgrad
- kein Aufwand für Zwischenmanipulationsschritte
- hohe Umformgeschwindigkeit
- große Rohrlängen

Dabei wird das ebene Blechband durch eine Abfolge von Biegeoperationen zu einem Spaltrohr gebogen wie in Abbildung 3.2.1-2 dargestellt. Diese Darstellungsform, in der die einzelnen Umformstufen vom Band zum Spaltrohr dargestellt sind, wird auch als „Blume“ bezeichnet.

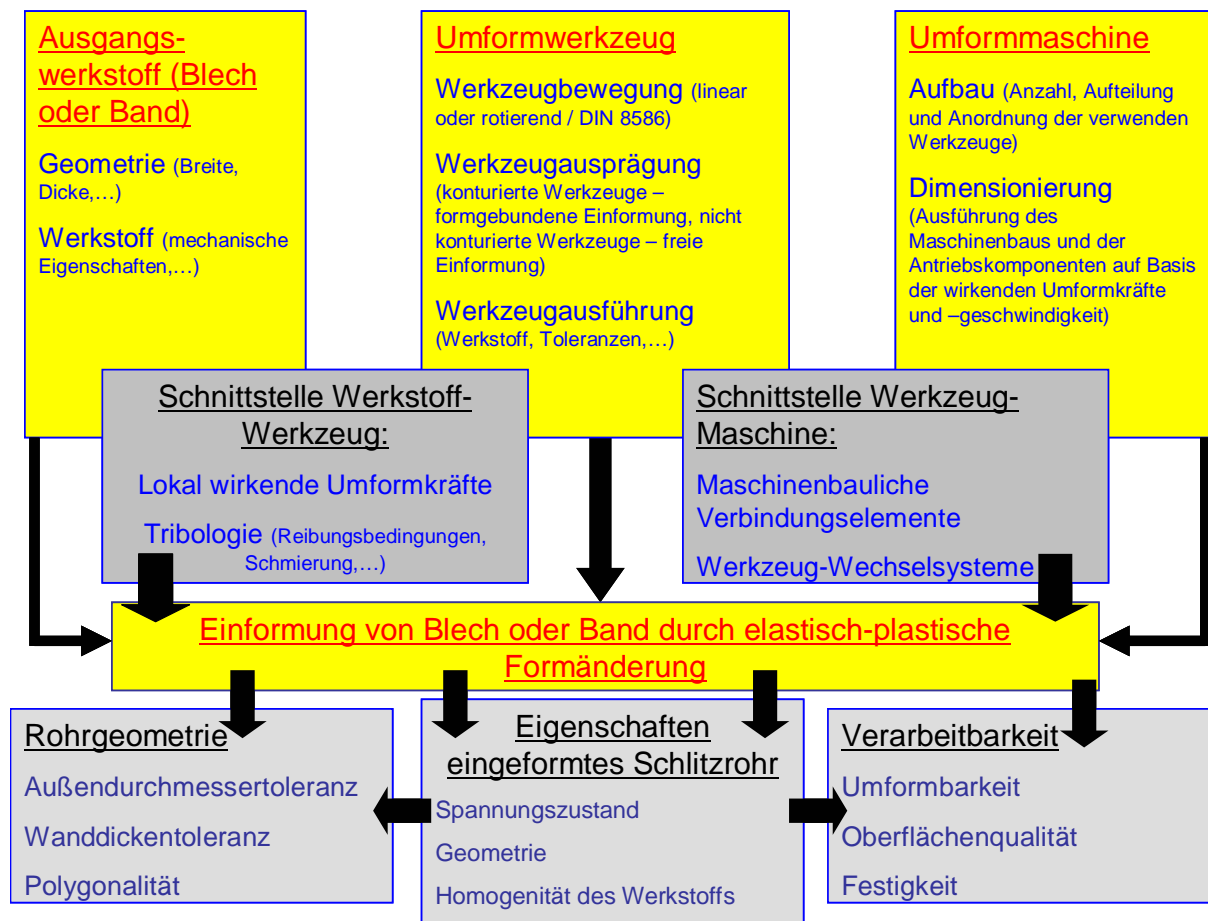


Abbildung 3.2.1-1: Strukturelle Zusammenhänge der primären Blechumformoperationen zur Herstellung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren

Der Vorgang des Rollbiegens kann nach Abbildung 3.2.1-1 mittels konturierter oder nicht konturierter Werkzeugen erfolgen. Der Verfahrensbegriff für die Verwendung konturierter Werkzeuge lautet „**formgebundene Einförmung**“ und die zugehörigen Technologiebegriffe nennen sich Formwalzverfahren, Walzprofilieren oder Rollforming. Abbildung 3.2.1-3 zeigt den Formenzwang, der auf das Band durch die konturiert ausgeführten Rollen sowohl vertikal als auch horizontal aufgebracht wird. Jedem Rollenpaar ist somit bereits durch die Auslegung

eine definierte Umformoperation zugeordnet, deren Erfüllung nötig ist, um die entsprechenden Ausgangsbedingungen für die unmittelbar darauf folgende Biegeumformung durch das nächste Rollenpaar sicherzustellen. Somit ist bereits hier zu erkennen, dass die Einsetzbarkeit des Walzprofilierens zur Herstellung von unterschiedlichen Hauptrohrarten sehr stark von der Werkzeugausführung abhängt.

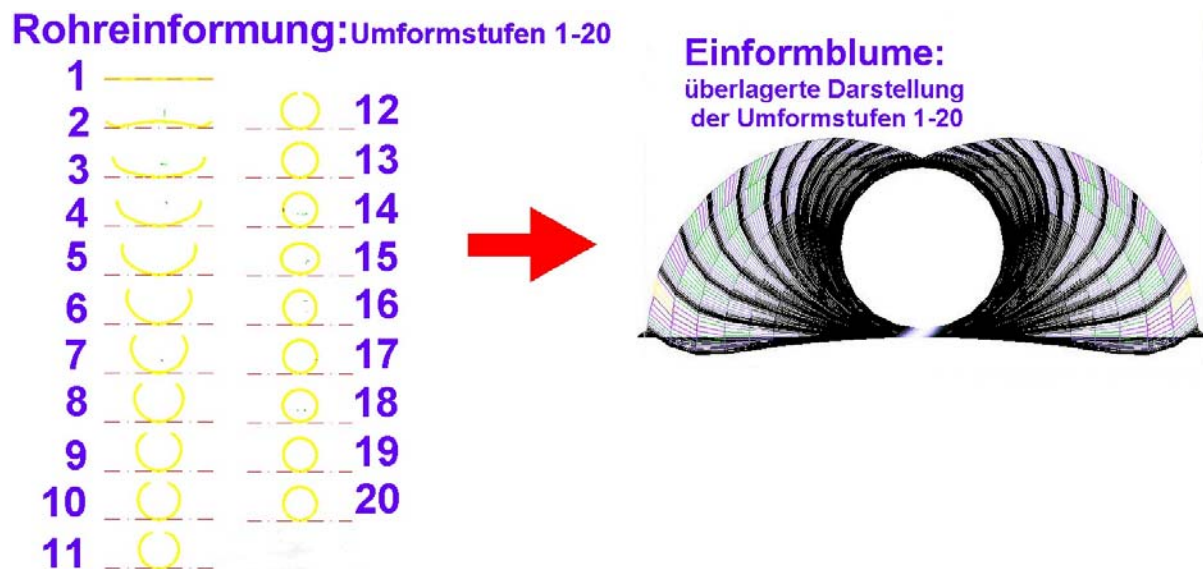


Abbildung 3.2.1-2: Umformschritte für das Rollbiegen eines Spaltrohres [81]

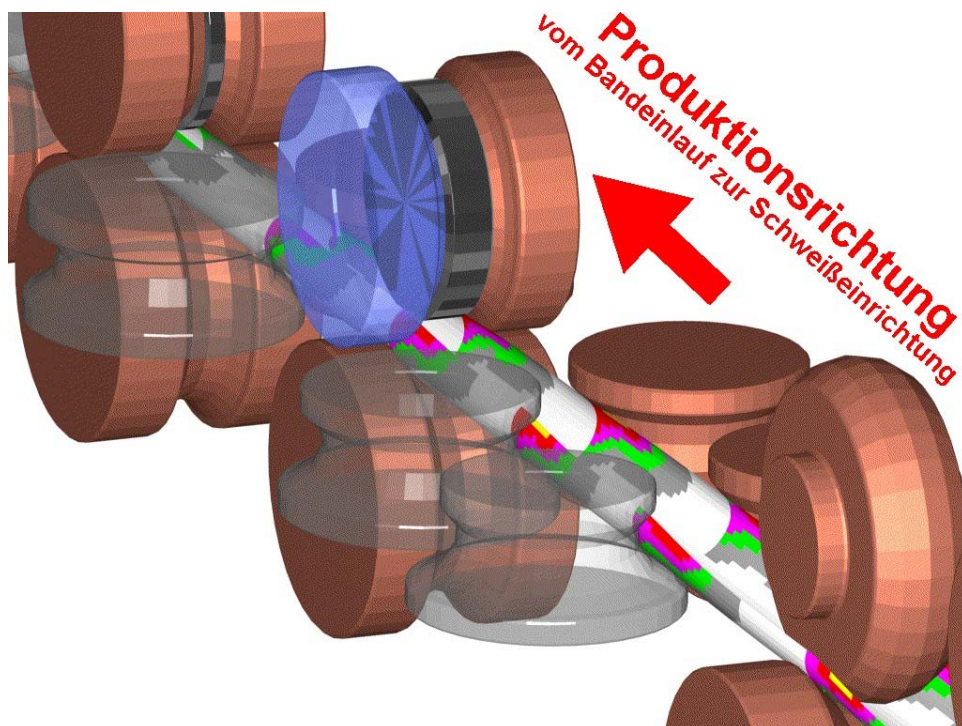


Abbildung 3.2.1-3: Kontinuierliche Umformung während des Walzprofilierens durch konturiert ausgebildete Werkzeuge [81]

Werden nicht konturierte Werkzeuge verwendet, spricht man vom Verfahrensbegriff „**freie Einformung**“ und aus technologischer Hinsicht von Linealeinformung oder Einformung über Rollenkäfig. Ein Einformlineal zur Rohrherstellung ist von seiner Grundfunktion aufgebaut wie ein konischer Trichter durch den das Band gezogen wird. Wie in Abbildung 3.2.1-4 dargestellt, besteht eine solche Anordnung aus einem Außenlineal mit vielen zylindrischen Rollen, die durch Zustellung und Winkelverstellung auf unterschiedliche Rohrdurchmesser justiert werden können und einem Innenlineal mit einigen ballig ausgeformten Rollen, die die Stabilität des Bleches während der Einformung gewährleisten.

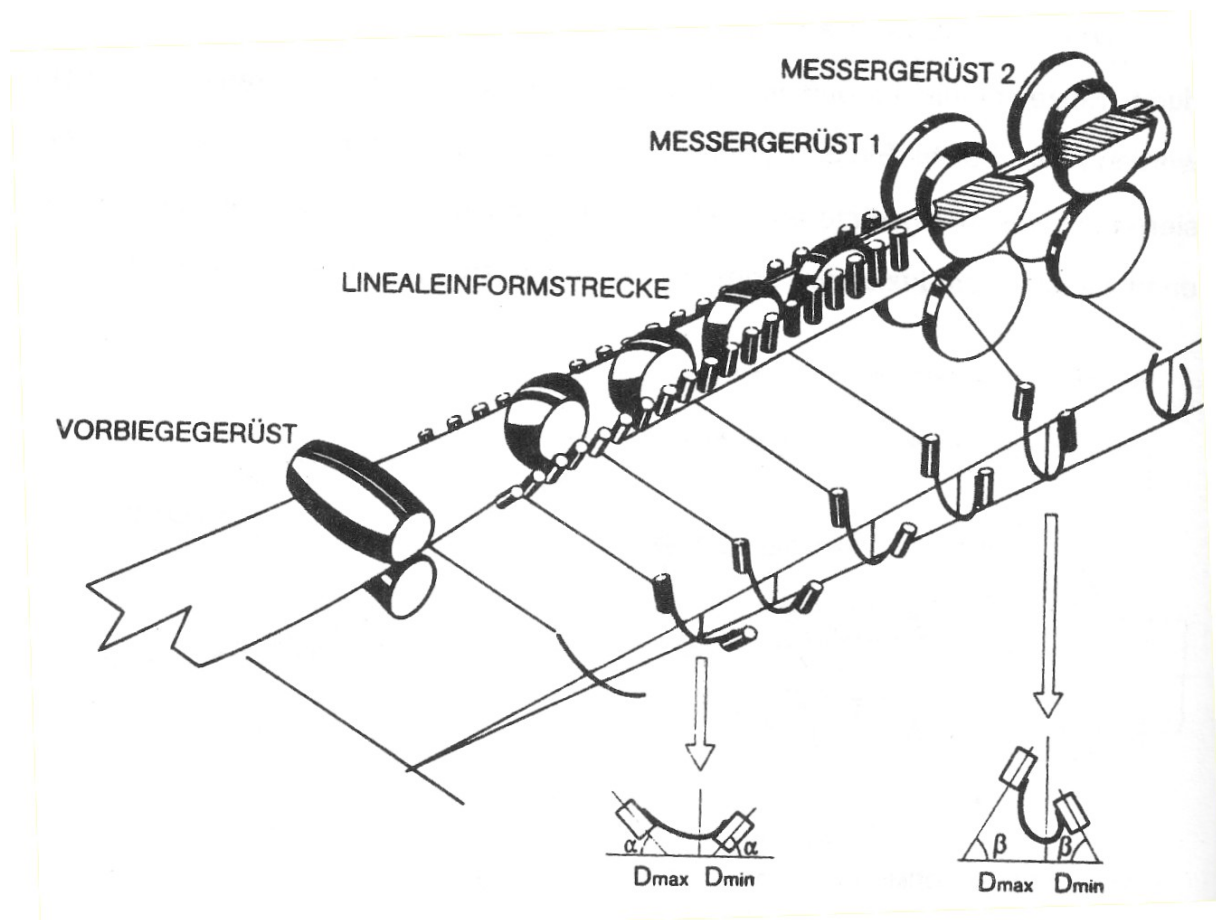


Abbildung 3.2.1-4: Rohreinformung mittels Formwalzwerk bestehend aus äußerem und innerem Umformlineal [47]

Betrachtet man Abbildung 3.2.1-1 so verschiebt sich für die **Verwendung der Linealeinformung** der Schwerpunkt der Bedeutung für die Qualität des einformten Schlitzrohres, im Gegensatz zum Walzprofilieren, vom Umformwerkzeug auf die Umformmaschine. Dies hat den Vorteil, dass Werkzeugkosten durch die Verwendung eines solchen Rollenkäfigs unter Einbußen der erzielbaren Toleranzen, gesenkt werden können. Quantitativ bedeutet dies, dass Grenzabmaße für den Außendurchmesser, wie in Tabelle 3.1.2-2 zusammengefasst, nur bis Toleranzklasse D3 gefertigt werden können. Damit können in der Regel die Erfordernisse für Konstruktionsrohre, Abgas führende Leitungen im Automobilbau, Wärmetauscherrohre und Leitungsrohre für Anlagenbau ausreichend gut erfüllt werden. Ein weiterer Vorteil der Linealeinformung liegt in den geringeren Rüstzeiten,

da ein Werkzeugwechsel durch eine reine Justage der Rollenpositionen ersetzt wird. Somit ist es auch möglich kleinere Losgrößen wirtschaftlich zu fertigen.

Die **Anwendungsgebiete des Walzprofilierens** liegen dort wo die Grenzen der nichtformgebundenen Einformung erreicht werden, also bei Rohrdurchmessern kleiner 20 mm, bei großen Wanddicken-Durchmesser-Verhältnissen ab 1:4, höherfesten Werkstoffgüten und engeren Toleranzen der Rohrgeometrie. Da die Profilierrollen die Kontur der jeweiligen Umformstufe tragen, ist es möglich die Umformkräfte durch Linienberührung gleichmäßiger auf das Band aufzubringen als bei Rollen in Einformlinealen, wo nur Punktberührung vorherrscht. Dementsprechend kann und muss mit den Themen Reibung, Verschleiß der Werkzeuge und Oberflächenqualität des erzeugten Schlitzrohres sensibler umgegangen werden. Gerade bei geringen Gerüstabständen, was eine sehr kurze Abfolge der liegend und stehend angeordneten Formrollen zur Folge hat, weist Rollforming eine sehr gute Stabilität des Bandes gegen Verschieben, Drehen und Knicken während der Einformung auf. Die Genauigkeit der Lage und Form der Konturierung in einer solchen Profilierrolle liegt im Bereich kleiner zwei Hundertstel Millimeter, was die Einhaltung der Toleranzklasse D4 für den Rohraußendurchmesser nach Tabelle 3.1.2-2 möglich macht.

Der **Einfluss der Umformoperationen** auf die **Rohrwanddicke** des fertig gestellten Rohres ist geringer einzuschätzen als jener des Schweißens der Längsnaht. Bei entsprechender Auslegung der Rollensatzkontur, ist es beim Rollforming wesentlich besser möglich, im Vergleich zum Formwalzen, unerwünschte Wanddickenreduktionen oder Aufstauchen der Blechdicke durch zu hohe lokale Flächenpressung hintanzuhalten. Dasselbe gilt grundsätzlich für die **Rundheit** der sich ergebenden Innenkontur des Rohres, da die aufgebrachten plastischen Dehnungen je Umformschritt beim Walzprofilieren wesentlich geringer sind als bei Verwendung eines Rollenkäfigs mit kurzer Einformstrecke.

Aus diesen Gründen wird **Walzprofilieren** vor allem zur Herstellung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren im **Durchmesserbereich** zwischen **6 und 30 mm** und **Wanddicken-Durchmesser-Verhältnissen** bis zu **1:4** verwendet. Damit können vor allem Treibstoff, Öl oder Kühlmedien führende Leitungen im Automobilbau, Wärmetauscherrohre, Leitungsrohre für die Lebensmittelindustrie und Medizintechnik und Steuerleitungsrohre für Hydraulik- und Druckluftsysteme sehr gut realisiert werden.

Die **Umformgeschwindigkeiten** für alle beschriebenen, **kontinuierlich arbeitenden Umformkonzepte** liegen zwischen **2 und 140 Meter pro Minute** und sind im wesentlichen von der entsprechenden Auslegung der nötigen Antriebsleistung und der Dimensionierung der Umformmaschine in Bezug auf den verwendeten Ausgangswerkstoff bestimmt. Neben den qualitativen Unterschieden ist die Abgrenzung der Technologien vor allem in Bezug auf die Begriffe Werkzeugkosten, Umbau-, Rüst- und Justagezeiten und Prozessstabilität zu sehen.

3.2.2 Einfluss des Schweißverfahrens

Die noch nicht verbundenen Kanten des zu einem Rohr geformten Bleches oder Bandes können unter Anwendung unterschiedlicher Schweißverfahren miteinander verbunden werden. Nach Abbildung 3.1.1-1 werden sowohl Widerstands-Press- als auch Schmelzschweißverfahren eingesetzt. Die Auswahl des Verfahrens erfolgt einerseits nach technischen Notwendigkeiten um bestimmte Qualitätsmerkmale des Endprodukts erfüllen zu können und andererseits in Abstimmung mit den Möglichkeiten der restlichen Prozesstechnologie.

Wie schon in Bezug auf den Einfluss des Umformverfahrens müssen auch hier längsnahtgeschweißte Leitungsrohre im Anlagenbau im Dimensionsbereich über 600 mm Aussendurchmesser und 16 mm Wanddicke separiert betrachtet werden. Die Mantelfläche der aus Blech eingerollten oder gepressten Rohrschüsse wird mittels Metallschutzgas- (MSG) oder Unterpulverschweißen (UP) durch eine ein- oder mehrlagige Längsnaht geschlossen. Bei großen Rohrwanddicken über 20 mm wird das MSG-Verfahren zur Erzeugung einer Heftnaht verwendet, die neben der präzisen Lage der zu verschweißenden Kanten auch gleichzeitig die Schweißbadsicherung für nachfolgende UP-Schweißraupen sicherstellt. Bei diesen Abläufen handelt es sich weniger um eine automatisierte Fertigung als vielmehr um Fertigungsformen am Übergang zur **Werkstätten- oder Kleinserienfertigung**, wodurch die pauschale Angabe einer maximal möglichen Schweißgeschwindigkeit nicht wirklich möglich ist.

Die **kontinuierliche Fertigung** von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren macht den Einsatz von effizient arbeitenden Schweißverfahren nötig, da die möglichen **Schweißgeschwindigkeiten** deutlich **unter** den maximal **möglichen Umformgeschwindigkeiten** zu liegen kommen. Es kommen sowohl Schmelz-, Strahl- und Pressschweißverfahren zum Einsatz. Die wichtigsten Schweißverfahren für die Herstellung von geschweißten Edelstahlrohren sind das Wolfram-Inertgasschweißen (WIG), das Laserstrahlschweißen und Hochfrequenzwiderstands-Pressschweißen (HF). Der Anwendung dieser Verfahren ist gemein, dass es unmittelbar nach der Einformstrecke zu einer Erwärmung oder einem Aufschmelzen der Bandkanten kommt um diese kontinuierlich miteinander verbinden zu können. Auf eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise dieser Verfahren und deren Anwendung in der Rohrfertigung sei auf Abschnitt 6.1.2 verwiesen.

Betrachtet man Abbildung 3.2.2-1, so ist zu erkennen, dass **WIG-Schweißen** das am weitesten verbreitete Verfahren in der Rohrindustrie, sowohl global als auch für Europa gesehen, darstellt. Der Grund für diese **weite Verbreitung** liegt einerseits in der **großen Flexibilität** und dem **großen Produktspektrum**, welches auf Grund der hohen Schweißnahtqualität abgedeckt werden kann und andererseits in den vergleichsweise geringen Investitionskosten. Mit Stand 2003 existierten rund 2600 Rohrproduktionsanlagen für die kontinuierliche Herstellung längsnahtgeschweißter Edelstahlrohre. Global gesehen waren davon 85 Prozent mit WIG-Schweißeinrichtungen ausgerüstet [45]. **Laserstrahlschweißen und HF-Schweißen** haben bezogen auf die Anzahl der Produktionsanlagen geringere Bedeutung. Das der Anteil an WIG-Anlagen für den Betrachtungsbereich Europa abnimmt, ist auf den zuvor beschriebenen Zusammenhang zwischen großem Einsatzbereich und geringen Anschaffungskosten zurückzuführen. Gerade in weniger industrialisierten Regionen, wie Südamerika oder Teilen von Asien, werden deshalb vorwiegend Rohrstraßen mit WIG-Schweißtechnologie verwendet, um die Start-Up-Kosten so gering wie möglich zu halten, auch wenn viele der Produkte aus wirtschaftlicher Sicht nur im suboptimalen Bereich erstellt werden können. Ein wesentliches **Maß für die Wirtschaftlichkeit** einer kontinuierlich arbeitenden Rohrschweißanlage ist die **Produktionsgeschwindigkeit** in Meter pro Minute oder die **maximale Ausstoßmenge** in Tonnen pro Jahr. In Industrieländern wie in Europa ist es nicht möglich die Lohnstückkosten je Laufmeter Edelstahlrohr wesentlich durch eine Verringerung des Personalkostenblocks nach unten zu drücken. Viel mehr ist eine Senkung der Lohnstückkosten durch eine Steigerung des Produktionsausstoßes und damit der Schweißgeschwindigkeit zu erreichen. Dieser Überlegung entsprechend werden Rohrstraßen, die mit WIG-Schweißeinrichtungen versehen sind, immer häufiger auf Laserstrahlschweißen umgerüstet oder ersetzt. Die dazu nötigen hohen Investitionskosten, welche rund das zeh- bis zwanzigfache einer WIG-Schweißeinrichtung ausmachen, können immer häufiger durch die

höheren Produktionsgeschwindigkeiten gerechtfertigt werden. Der europäische Anteil für Laserschweißanlagen liegt deshalb um 6 Prozent höher als jener global gesehen.

Die Darstellung der **maximal möglichen Produktionsgeschwindigkeiten** für die betrachteten Schweißverfahren zur kontinuierlichen Herstellung längsnahtgeschweißter Edelstahlrohre in Abbildung 3.2.2-2 macht deutlich, dass WIG- und Laserstrahlschweißen einen sehr ähnlichen Anwendungsfokus haben im Vergleich zum HF-Schweißen. WIG- und Laserstrahlschweißen haben beträchtliche Geschwindigkeitsdefizite gegenüber dem HF-Schweißen. Auf Grund des **Pressschweißens** können jedoch nur **Schweißfaktoren bis 0,8** erreicht werden. Dies bedeutet, dass die zulässigen Spannungen in der Schweißnaht bei statischer Beanspruchung nur 80 Prozent des ertragbaren Niveaus im Grundwerkstoff ausmachen dürfen. Dieses Ausführungskriterium ist entsprechend in der Produktnorm DIN 17455 angeführt und somit für HF-geschweißte Edelstahlrohre als Standard definiert. **WIG- und lasergeschweißte Rohre** können jedoch so gefertigt werden, dass sie **Schweißfaktor 1** aufweisen. Somit ist die Schweißnaht gleich belastbar wie der Grundwerkstoff, was eines der wesentlichen Differenzierungskriterien dieser beiden Verfahren gegenüber dem HF-Schweißen darstellt.

Vergleicht man in Abbildung 3.2.2-1 den Anteil, den die einzelnen Schweißverfahren an der im Jahr 2003 gesamt produzierten Menge von 2,6 Millionen Tonnen haben, so zeigen sich die Vorteile in Bezug auf die Schweißgeschwindigkeit der HF-Anlagen. Sechzig Prozent an längsnahtgeschweißtem Edelstahlrohr werden auf Hochfrequenz-Schweißanlagen hergestellt, die aber absolut nur vier Prozent der Produktionsmöglichkeiten ausmachen [45]. Eine Umstellung der Produktion von WIG- auf HF-Schweißen ist mit wesentlich größerem Aufwand verbunden als ein Umstieg auf Laserstrahlschweißen. Dies ist auf die bedeutend höheren Investitionskosten für eine HF-Rohrstraße zurückzuführen. Durch die größeren Ausstoßmengen benötigen HF-Anlagen wesentlich mehr Produktions- und Lagerflächen und verringern somit auch die Flexibilität der Produktionseinrichtung.

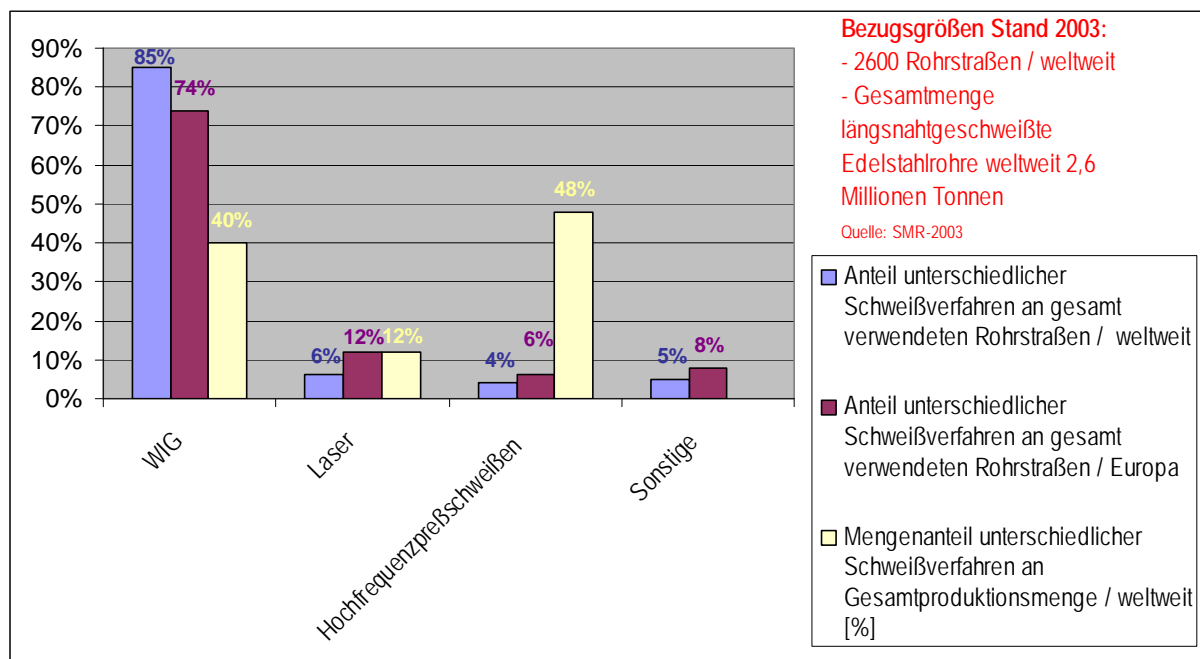


Abbildung 3.2.2-1: Anteil eingesetzter Schweißverfahren zur Herstellung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren in Bezug auf weltweit bestehende Rohrstraßen und produzierte Gesamtmenge [45]

Fasst man all diese **Aspekte der einsetzbaren Schweißverfahren** in der kontinuierlichen Fertigung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren zusammen, so ergibt sich folgendes Bild. **Hochfrequenz-Pressschweißen** eignet sich bevorzugt zur Herstellung von Konstruktionsrohren für dekorative Anwendungen und Sichtflächen, da hier die **Anforderungen an die Schweißnaht** zumeist eine **untergeordnete Rolle** spielen und die größte jährliche Tonnage aller Marktsegmente zu erzeugen ist. Würde als Vergleich die benötigte Menge an Konstruktionsrohr von 650 Tausend Tonnen [45] mit WIG-Schweißanlagen mit einem maximalen jährlichen Ausstoß von 600 Tonnen hergestellt, so müssten rund 1100 zusätzliche Anlagen in Betrieb genommen werden. Ein weiteres Charakteristikum, das HF-Schweißeinrichtungen eher für **große Produktionsmengen wirtschaftlich** macht, sind die **zeitintensiven Dimensionswechsel**, da sowohl Konduktor oder Induktor als auch Magnetkern getauscht werden müssen. Auch ein Marktsegment für HF-geschweißte Rohre sind Leitungsrohre im Abgasstrang von Fahrzeugen. Jedoch gewinnt hierbei zunehmend das lasergeschweißte Rohr an Bedeutung, da Umformoperationen wie Innenhochdruckumformen auf Grund der höheren Schweißnahtqualität wesentlich besser realisierbar sind.

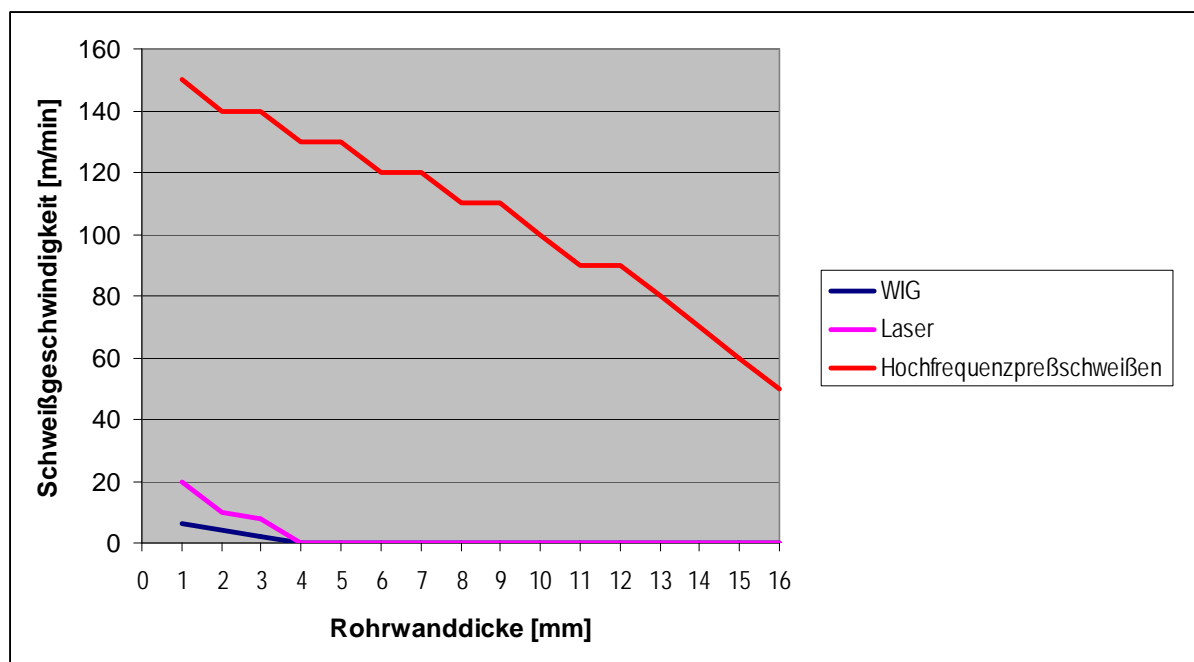


Abbildung 3.2.2-2: Grenzen der Schweißverfahren zur Herstellung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren nach Rohrwanddicke und Schweißgeschwindigkeit

Leitungsrohre im Anlagenbau für chemische und petrochemische Anwendungen, die mittels kontinuierlicher Einformverfahren erzeugt werden, sind bevorzugt **WIG-geschweißt**. Für diesen Anwendungsfall wird die **korrosionsbedingte und mechanische Belastbarkeit** der WIG-Naht geschätzt. Weiters eignen sich diese Edelstahlrohre auch hervorragend als Halbzeug zur Herstellung von **Bögen und Schweißfittings**, die ebenfalls für diesen Bereich benötigt werden. Laserstrahlschweißen hat in diesem Marktsegment dem WIG-Schweißen noch keine wesentlichen Marktanteile abnehmen können. Das Wolfram-Inertgasschweißen bietet weiters die Synergie, dass zwar die Einsetzbarkeit des Verfahrens analog zum Laser auf Wanddicken bis 3 mm beschränkt ist, der Anwendungsbereich jedoch durch den Einsatz des **WIG-Plasma-Schweißens (WP)** bis auf eine Rohrwanddicke von 10 mm erweitert werden

kann. Zumeist sind die verwendeten Schweißeinrichtungen von Gaszuführung und Aufbau bereits so ausgelegt, dass sowohl WIG- als auch WP-Schweißen ohne größeren Umrüstaufwand möglich ist. Weitere Anwendungsgebiete für WIG-geschweißte Edelstahlrohre sind **Steuerleitungsrohre** für druckbeaufschlagte Anwendungen, Wärmetauscherrohre und Leitungsrohre in der Lebensmittel und Medizintechnik, wobei die Gründe für den Einsatz unterschiedlich sind. Steuerleitungsrohre werden zumeist in nachgezogenen Güten verwendet um die entsprechenden Toleranzen realisieren zu können. Es ist grundsätzlich zu bemerken, dass sich die Geometrie der WIG-Schweißnaht besser für Stangen- und Stopfenzug eignet, was auf die sehr flache, glatte und homogen verlaufende Schweißnahtwurzel zurückzuführen ist. Hier zeigt die Lasernaht deutliche Nachteile auf Grund der raueren Oberfläche und der stärkeren Überhöhung der Schweißnahtwurzel. Darin ist auch der Hauptgrund zu sehen, dass rund 75 Prozent des Bedarfs an geschweißten **Edelstahlrohren für die Lebensmittelindustrie** auf WIG-Anlagen hergestellt werden. Für diesen Anwendungsfall spielt jedoch die möglichste glatte Ausprägung der Schweißnahtwurzel eine andere Rolle. Die Rauigkeit der Innenoberfläche ist deshalb begrenzt, um möglichst wenige Angriffspunkte zum Sammeln von Verunreinigungen, Keimen oder Ablagerungen zu bieten. Die WIG-Schweißnaht wird bei Rohren zur Anwendung in Wärmetauschern vor allem deshalb geschätzt, da sie eine sehr gute Verformbarkeit und geringe Härte aufweist. **Rohre für Rohrbündelwärmetauscher** müssen in Lochplatten stirnseitig eingedichtet werden, was sowohl über Rundschweißnähte oder Einrollen der Rohrenden erfolgen kann. Das Einrollen der Rohrenden ist dabei das wesentlich wirtschaftlichere Verfahren, da Anarbeitungsoperationen entfallen und das Rohr einfach mittels eines rotierenden Werkzeugs von innen nach außen umgebördelt wird. Die Oberfläche dieses Werkzeugs wälzt sich an der Rohrrinnenoberfläche ab und wird durch eine stark durchhängende Schweißnahtwurzel immer wieder schlagartige belastet, was zu erhöhtem Werkzeugverschleiß führt. Generell gesehen verliert das WIG-geschweißte Edelstahlrohr für Wärmetauscher in Summe an Mengenteilen, da bei Wärmetauschern mit eingeschweißten Rohrbündeln eher das kostengünstigere lasergeschweißte Rohr verwendet wird. Betrachtet man den Durchmesserbereich, so eignet sich das **WIG-Schweißen** sehr gut für **Rohre zwischen 6 und 25 mm Außendurchmesser**.

Das **Laserstrahlschweißen** kommt seit Mitte der Neunziger Jahre in der Rohrfertigung zum Einsatz ausgehend von Anwendungen für die **Automobilindustrie**. Vor allem Treibstoff führende Leitungen werden im Durchmesserbereich zwischen 30 und 50 mm und mit Wanddicken zwischen 0,4 und 0,5 mm mittels Laser geschweißt. Der Anreiz liegt vor allem für große Produktionslose in der doch deutlich **steigerbaren Schweißgeschwindigkeit** gegenüber dem WIG-Verfahren, wie in Abbildung 3.2.2-2 dargestellt ist. Die **Produktqualität** ist als grundsätzlich ähnlich zu Bezeichnen und unterscheidet sich nicht so deutlich wie jene von HF-geschweißten Rohren. Vorallem für Anwendungen, wo die **Innenkontur** eine untergeordnete Rolle spielt, stellen lasergeschweißte Edelstahlrohre sicher die wirtschaftlichere Alternative dar. Aus diesem Grund wurde das Anwendungsspektrum in der Fahrzeugindustrie auch auf die Bereiche „Abgas führende Leitungen innerhalb des Motorraums“ und „Einspritzleitungen“, wie zum Beispiel für Common-Rail-Motoren, erweitert. Dazu war es notwendig vor allem die Laserleistungen entsprechend weiterzuentwickeln, wodurch heute Rohre bis zu einer **Wanddicke** von 3 mm problemlos mittels Laser geschweißt werden können. Die größere Wirtschaftlichkeit des Laserschweißens findet zur Zeit gerade auch in anderen Marktsegmenten zunehmend Eingang, da es in der Produktnorm DIN 17457 eine grundsätzliche Gleichstellung der beiden Schweißverfahren gibt.

3.2.3 Einfluss der Wärmebehandlung

Auf Grund der Vielzahl an Prozessschritten, die notwendig sind um aus einem Band ein Rohr zu erstellen, kommt es zu einer wesentlichen Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften. Diese Veränderung der Werkstoffeigenschaften kann nur innerhalb bestimmter Grenzen während des Herstellungsverfahrens beeinflusst werden. Nicht in jedem Fall ist eine solche Veränderung als negativ anzusehen, beispielsweise kann ein **Aufbringen von Kaltverfestigung** im Zuge des Rollbiegens durchaus positiv für die Herstellung von mechanisch beanspruchten Konstruktionsrohren gesehen werden. In vielen Fällen jedoch wird der Ausgangszustand des verarbeitenden Blechs als Referenz für die mechanischen und korrosionschemischen Eigenschaften des längsnahtgeschweißten Edelstahlrohres betrachtet. Die Anwendung einer Wärmebehandlung stellt dabei ein geeignetes Instrumentarium zur **gezielten Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften** des gefertigten Rohres dar.

Die Durchführung einer Glühoperation an geschweißten Rohren aus nichtrostenden Stählen kann folgende Motive haben [48]:

- Kristallerholung bis zur Rekristallisation des Gefüges
- Ausgleich von Mikroseigerungen, im Speziellen der Legierungselemente Chrom und Molybdän
- Abbau von Delta-Ferritanteilen
- Reduktion von Eigenspannungen

Die Anwendung der Wärmebehandlung erfolgt demnach einerseits, um die **Korrosionsbeständigkeit** des geschweißten Rohres sicherzustellen und andererseits um die **mechanischen Eigenschaften** beeinflussen zu können. Wobei die Abstimmung der mechanischen Werkstoffkennwerte zumeist im Fokus nachgelagerter Umformoperationen erfolgt, sodass das Optimierungskriterium zumeist im Bereich Duktilität und plastische Verformbarkeit zu finden ist.

In Bezug auf den Informationsstand von 2003 wurde nur rund die Hälfte aller weltweit produzierten Rohre einer Wärmebehandlung unterzogen. Dieser Anteil wird vor allem durch die Hauptrohrarten Konstruktionsrohre für dekorative Anwendungen und Sichtflächen und Leitungsrohre für Abgas führende Leitungen im Automobilbau bestimmt. Konstruktionsrohre für architektonische Zwecke werden in der Regel einer kostengünstigeren Schleifbehandlung der Außenoberfläche an Stelle einer Wärmebehandlung unterzogen. Große Bedeutung hat die Wärmebehandlung von geschweißten Leitungsrohren für den Anlagenbau im Chemiebereich, Wärmetauscherrohren, Leitungsrohren für Lebensmittelindustrie und Medizintechnik und druckbeaufschlagte Steuerleitungen [45].

Gerade in jenen Bereichen, wo die **korrosionschemischen Eigenschaften** größte Wichtigkeit haben, bieten **längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre** gegenüber **nahtlosen Rohren** wesentliche Kostenvorteile. Die Herstellungskosten für geschweißte und geglühte Rohre liegen rund 50 Prozent unter jenen von nahtlosen, wärmebehandelten Rohren. Jedoch kann nicht davon ausgegangen werden, dass die unbehandelte Schweißnaht dieselbe Korrosionsbeständigkeit aufweist wie der Grundwerkstoff, da sie keinen homogenen Mischkristall darstellt. Durch die geringe Diffusionsgeschwindigkeit von Chromatomen im

kubischflächenzentrierten Gitter des Austenits bilden sich Ausscheidungen chromreicher Phasen an den Korngrenzen. Es entstehen lokale Entmischungserscheinungen. Diese Problematik wird sehr häufig als **Sensibilisierung** des Werkstoffs und in ihrer Ausprägungsform als **Interkristalline Korrosion** bezeichnet [49].

Hinsichtlich der eingesetzten Methoden zur Wärmebehandlung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren können zwei grundsätzliche Ansätze unterschieden werden.

Die klassische Methode zur Wärmebehandlung von geschweißten Rohren wurde aus dem Bereich der Nahtlosrohrherstellung übernommen. Rohre werden mittels kontinuierlicher oder diskontinuierlicher Einförmung vom Blech oder Band erzeugt und längsnahtverschweißt. Diese Fixlängen, welche zumeist zwischen 6 und 12 Meter liegen, werden einer **Glühbehandlung in einem Durchlaufofen** unterzogen. Wobei hierbei die Rohrfertigung und die Wärmebehandlung als zwei getrennte Prozessschritte zu sehen sind. Abbildung 3.2.3-1 zeigt schematisch die kontinuierliche Fertigung von geschweißten Rohren mit angeschlossener Wärmebehandlung. Durch die Wärmeeinbringung und das Freiwerden von Eigenspannungen kommt es zu Verwerfungen und Säbeligkeit des Rohres. Aus diesem Grund ist ein nachträgliches Richten unumgänglich. In der Regel werden dazu Schrägrollenrichtwerke verwendet, wobei auch hier die Vorgänge Glühen und Richten durch Manipulationsschritte getrennt sind.

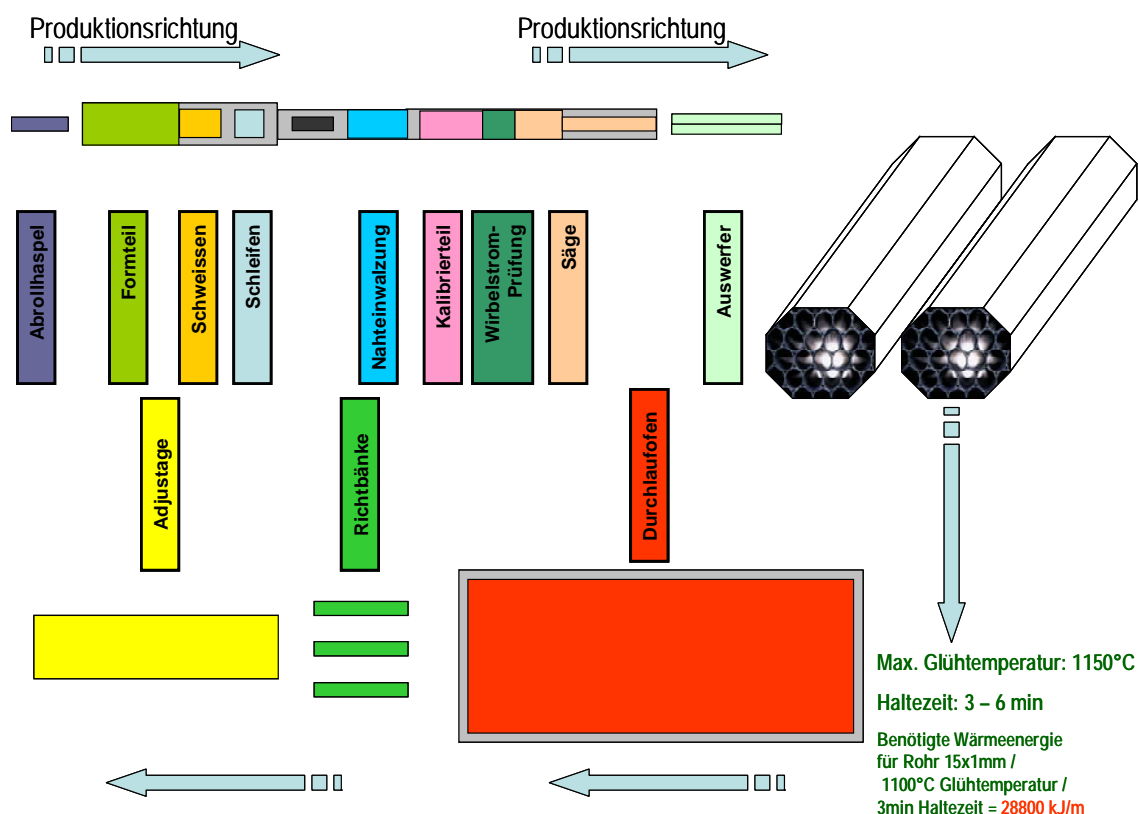


Abbildung 3.2.3-1: Kontinuierliche Fertigung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren vom Band mit angeschlossenen Wärmebehandlungs- und Nacharbeitsoperationen

Abschließend müssen die Rohre nochmals einer Endprüfung zur Qualitätssicherung unterzogen werden. Die Zusammenfassung dieser Prüfoperationen und die von Beschriftungs- und Verpackungsschritten erfolgt unter dem Begriff **Adjustage**.

Durchlauföfen können als Muffel-, Förderband- oder Rollherdöfen ausgeführt sein. **Muffelöfen** weisen insbesondere für diesen Anwendungszweck das Problem auf, dass die Wahrscheinlichkeit von Beschädigungen an der Rohroberfläche relativ hoch ist. Weiters wird die maximal mögliche Durchsatzmenge durch die Reibung zwischen Glühgestellen und Muffeln begrenzt. In Bezug auf die Beschädigung der Rohroberfläche bringt der **Förderbandofen**, wo der Vortrieb über ein Drahtförderband sichergestellt wird, eine Verbesserung. Jedoch ergibt sich hier die Problematik des nicht ungehinderten Schutzgaszutritts durch das Drahtförderband. Übliche Muffel- und Förderbandöfen liegen mit ihren Durchsatzmengen in Bereichen zwischen 400 und 500 Kilogramm pro Stunde [50]. Da eine kontinuierliche Fertigung von geschweißten Edelstahlrohren einen wesentlich höheren Ausstoß liefert, werden heute fast ausschließlich nur mehr **Rollherdöfen** gebaut. Dabei sind Durchsatzmengen von 1000 Kilogramm pro Stunde bei einer Haltezeit von 20 Minuten und einer Glühtemperatur von 1170°C durchaus möglich [50].

Vergleicht man die beschriebenen Marktsegmente in denen eine Wärmebehandlung nötig ist, so überdecken sich diese laut Abschnitt 3.2.2 stark mit den Anwendungsfeldern des WIG- und Laserschweißens für die kontinuierliche Rohrfertigung. Damit sind entsprechend Abbildung 3.2.2-2 Schweißgeschwindigkeiten bis 20 Meter pro Minute möglich. Vergleicht man dies mit der Durchsatzkapazität eines modernen Rollherdofens, welche umgerechnet bei einem mittleren Rohrgewicht von 0,8 Kilogramm rund 20 Meter pro Minute beträgt, so wird deutlich, wie die **Kapazität eines Glühofens** bereits durch eine Rohrstraße ausgeschöpft werden kann. Die Realisierung von externen Glüheinrichtungen ist gekennzeichnet durch hohe Investitionskosten und großen Platzbedarf. Weiters müssen im Sinne einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der hohe Energieeinsatz, siehe Beispiel Abbildung 3.2.3-1, und die zusätzlichen nachgelagerten Manipulations- und Bearbeitungsschritte betrachtet werden.

Aus diesen Gründen wurde versucht Alternativen für die nachgelagerte Wärmebehandlung zu finden. Als bewährtes Verfahren dazu wird in Abbildung 3.2.3-3 das **In-Linie-Kurzzeitglühen** schematisch dargestellt. Für diese Form der Wärmebehandlung existieren sehr viele unterschiedliche Begrifflichkeiten, wie Online-Kurzzeitglühen, Induktives Kurzzeit-Intensivglühen oder Inline-Glühen. Dabei ist die Glüheinrichtung in die Rohrstraße integriert und die Wärmebehandlung wird stetig am durchlaufenden Rohr durchgeführt.

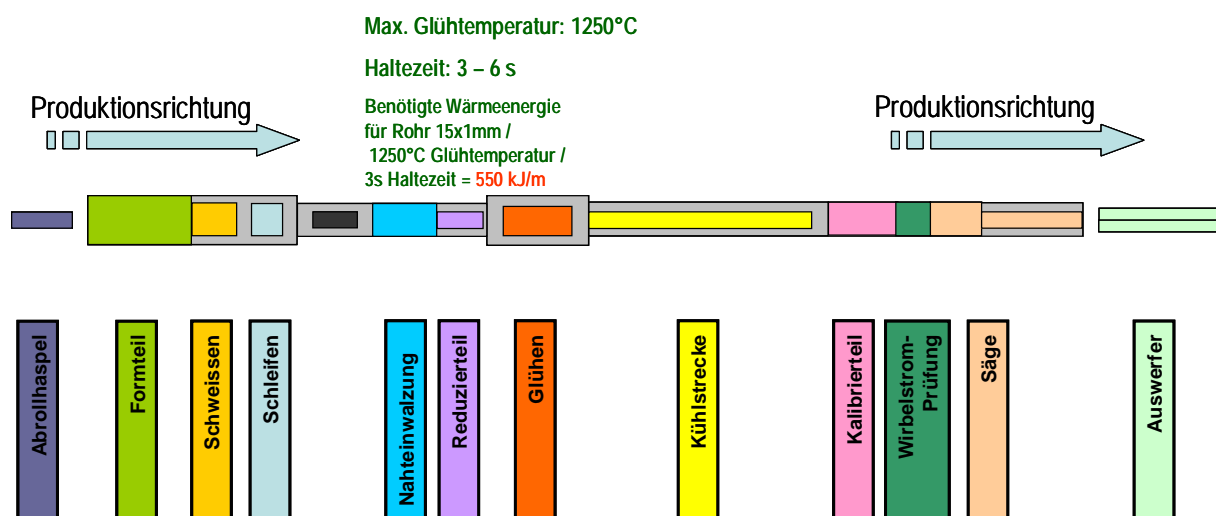


Abbildung 3.2.3-2: Kontinuierliche Fertigung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren vom Band mit integrierter Wärmebehandlung

Somit eignet sich dieses Verfahren nur für die kontinuierliche Fertigung von Rohren, wobei die Glühstrecke direkt nach der Schweißeinrichtung angeordnet sein kann. Folgen nach dem Schweißen der Längsnaht noch weitere Umform- oder Kalibrierschritte, die zur Kaltverfestigung des Werkstoffs beitragen, so wird die Wärmebehandlung erst danach durchgeführt. Durch die stetige Verknüpfung des Glühprozesses mit der kontinuierlichen Rohrfertigung sind entsprechend hohe Aufheizgeschwindigkeiten nötig, die durch Induktionserwärmung sichergestellt werden. Eine solche In-Linie-Kurzzeitglühung ermöglicht Glühtemperaturen bis zu 1250°C, jedoch nur geringe Haltezeiten bis maximal 6 Sekunden.

Betrachtet man die Motive, die eine Wärmebehandlung nötig machen, so kann grundsätzlich gesagt werden, dass sowohl die Verformbarkeit als auch die Korrosionsbeständigkeit von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren durch **Verlängerung der Glühdauer** und **Erhöhung der Glüh Temperatur** verbessert werden können.

Die Glüh Temperatur beim In-Linie-Kurzzeitglühen liegt zwar geringfügig über jener von Glühprozessen in Durchlauföfen, jedoch reicht dies nicht aus, um den Nachteil der deutlich kürzeren Haltezeiten auszugleichen. Es kommt bei der in dem Rohrherstellungsprozess integrierten Wärmebehandlung zu keiner vollständigen Auflösung von Mikrosegmenten, sodass die Korrosionsbeständigkeit von Inline-geglühten Rohren nicht mit jener von extern geglühten Rohren verglichen werden kann [48].

Auf Grund dieses Zusammenhangs wird In-Linie-Kurzzeitglühen hauptsächlich für Rohre verwendet, die in Hinblick auf eine nachgelagerte Umformung hinsichtlich ihrer **Duktilität** optimiert werden müssen oder keinen extremen chemischen Beanspruchungen ausgesetzt sind. Es können somit sehr gut weite Bereiche der Marktsegmente Automobilindustrie und druckbeaufschlagte Steuerleitungsrohre bedient werden.

Der Hauptnachteil der Kopplung von Wärmebehandlung und Rohrproduktion liegt also in der **Abhängigkeit von Glühzeit und Produktionsgeschwindigkeit**. Dies führt dazu, dass die integrierte Glühbehandlung den geschwindigkeitsbestimmenden Prozessschritt für die Rohrstraße darstellt. Typische Produktionsgeschwindigkeiten für Rohrschweißanlagen mit integrierter Wärmebehandlung liegen zwischen 2 und 6 Metern pro Minute. Man erkennt also deutlich die Reduktion der möglichen Schweißgeschwindigkeit von bis zu 20 Metern pro Minute. Aus diesem Grund werden Induktionsglüheinrichtungen auch hauptsächlich in Kombination mit WIG-Schweißen eingesetzt, da man sich hier laut Abbildung 3.2.2-2 in einem ähnlichen Geschwindigkeitsbereich bewegt.

Die Betrachtung der **Wirtschaftlichkeit** von nachgelagerter und integrierter Wärmebehandlung lässt die Anwendungsgrenzen durchaus verschwimmen. Bezieht man die Mehrkosten für das In-Linie-Kurzzeitglühen auf die Herstellungskosten eines ungeglühten lasergeschweißten Edelstahlrohres, so ist mit einer Steigerung um rund 11 Prozent zu rechnen [82]. Dieser Kostenanstieg ist auf die Reduktion der Produktionsgeschwindigkeit von 25 auf 6 Meter pro Minute und einer Senkung der Anlageneffektivität von 95 auf 85 Prozent infolge von zusätzlichem Ausschuss aus Anfahrschrott zurückzuführen [82]. In Abbildung 3.2.3-3 ist dieser Vergleich in Bezug auf die Herstellungskosten des kontinuierlich gefertigten, ungeglühten Rohres K1 grafisch dargestellt.

Vergleicht man die **Herstellungskosten** eines längsnahtgeschweißten Edelstahlrohres, welches Off-line-Wärmebehandlungs- und Nacharbeitsschritten unterzogen wird, mit jenen des ungeglühten Rohres K1, so kommt es zu einer Kostensteigerung von 60 Prozent [82]. Dies bedeutet, die höhere Produktionsgeschwindigkeit der Rohrherstellung von 20 Meter pro Minute und die bessere Anlageneffektivität von 95 Prozent reichen nicht aus um die Mehrkosten aus der externen Wärmebehandlung ausgleichen zu können. Wie in Abbildung

3.2.3-3 dargestellt, werden die Mehrkosten wesentlich durch die Glühbehandlung verursacht, wobei sich diese hauptsächlich aus den hohen Energiekosten und Abschreibungen für den Durchlaufofen zusammensetzen. Durch die langen Haltezeiten in Durchlauföfen ergeben sich Energiekosten, die jene des In-Linie-Kurzzeitglühens um das fünfzig- bis sechzigfache übersteigen [82].

In den letzten 15 Jahren wurde deshalb verstärkt versucht integrierte **Wärmebehandlungsverfahren zu entwickeln**, die darauf abzielen die Haltzeiten entsprechend zu verlängern. Dies ist beispielsweise durch Erhöhung der Induktorlänge, Zwischenerwärmungseinrichtungen mit Infrarotstrahlern oder Mehrfacherwärmung kritischer Bereiche möglich. Die Investitionskosten und Betriebskosten liegen für solche Optimierungen trotz allem deutlich unter jenen einer konventionellen, externen Glühvorrichtung. Somit ist es heute üblich auch für Anwendung in korrosiven Atmosphären inline-geglühte Rohre zu verwenden. Wobei hierbei die Werkstoffwahl, die Abstimmung der Werkstoffeigenschaften auf die Anwendungsbedingungen und die prozeßbegleitenden, qualitätssichernden Maßnahmen eine größere Rolle spielen. Auf Grund des wettbewerbsfähigen Preises werden somit inline-wärmebehandelte Edelstahlrohre auch für Wärmetauscherrohre, Leitungsrohre in chemischer Industrie, Lebensmittelindustrie und Medizintechnik eingesetzt.

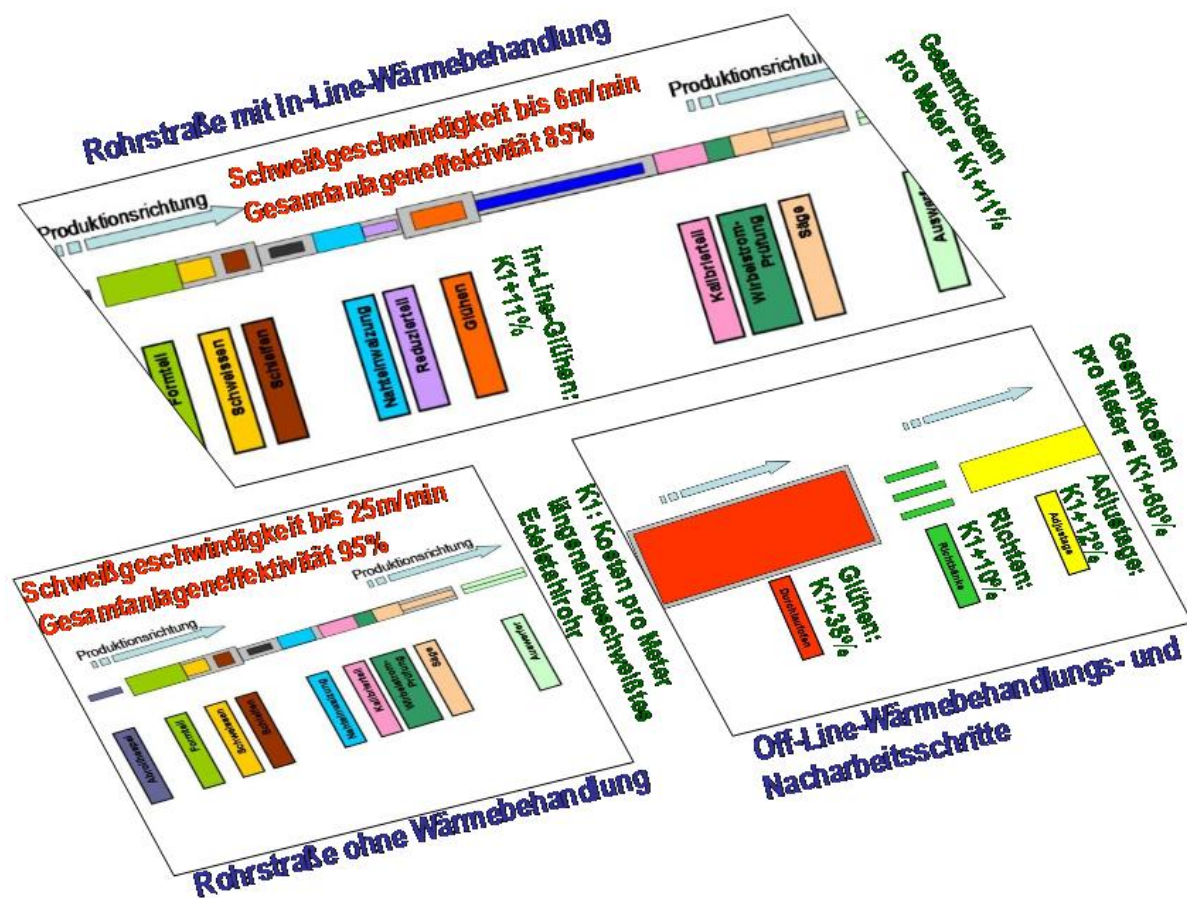


Abbildung 3.2.3-3: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung integrierter und nachgelagerter Wärmebehandlung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren [82]

3.3 Grundlagen der Produktivitäts- und Effektivitätsbetrachtung von Produktionsprozessen

Wegen des in vielen Produktionsunternehmen vorherrschenden hohen Automatisierungsgrades stellen die Produktionsanlagen einen wesentlichen Einflussfaktor auf die Produktionskosten, die Prozessqualität und damit auch die Produktqualität dar. Aus diesem Grund ergibt sich die Notwendigkeit für Unternehmen Konzepte zur Erzielung und Aufrechterhaltung höchster Effektivität der Produktionsanlagen einzusetzen. Mit steigendem Automatisierungsgrad spielt der Einfluss der Prozessqualität für die Fertigung eine größere Rolle. **Zuverlässigkeit** und Fähigkeit der Produktionsanlagen bestimmen in hohem Maß die Qualität der Fertigungsprozesse und somit der Produktqualität [68].

Nach Grundbesitz und Gebäuden sind die Produktionsanlagen normalerweise die größten Aktivposten eines Fertigungsunternehmens. Der **Kapitalertrag** ist ein übliches Maß für die Finanzleistung des Unternehmens. Die Nutzung der Aktiva ist der wichtigste Faktor, der die Kapitalerträge beeinflusst. Bei geringer Nutzung, Verfügbarkeit oder Leistung einer Betriebsanlage ist der Nutzungsgrad dieses Teils des Anlagevermögens somit sehr gering. Deshalb liegt ein Hauptbestreben des Anlagenbetreibers in der **Effektivitätssteigerung** um eine bessere Ausnutzung des eingesetzten Kapitals zu erhalten [69].

Die Betrachtung der Effektivität von Produktionsprozessen stellt somit eine Notwendigkeit sowohl aus qualitativer als auch quantitativer Sichtweise dar. Die grobe Betrachtung des Nutzens einer Produktionsanlage für ein Unternehmen kann auf Basis von gesamtheitlich ermittelten Betriebsdaten, wie maximal erzielbare Ausstoßmengen oder Beitrag zu Monatsergebnissen, ermittelt werden. Solche Überlegungen sind eher der Managementebene mit stark wirtschaftlichem Fokus zuzuordnen.

Auf Grund der Bedeutung von Produktionsanlagen und -prozessen durch die beschriebenen Zusammenhänge, verlagert sich auch die Verantwortung für das Themenfeld der **Anlageneffektivität** zunehmend in technisch orientierte Unternehmensbereiche. Die Betrachtung der Leistungsgrößen einer Produktionseinrichtung ist unmittelbar mit Betrieb und Bewirtschaftung verbunden. Aus diesem Grund liegt ein Schwerpunkt für eine differenzierte Effektivitätsbetrachtung im Bereich der Anlageninstandhaltung, da durch Definition entsprechender Kriterien erst ein effizientes Controlling der Wirksamkeit der Instandhaltungsaktivitäten erfolgen kann.

Das aus dem Bereich der Instandhaltung stammende **Managementkonzept „Total Productive Maintenance“ (TPM)** das von Seiichi Nakajima 1971 in Japan entwickelt wurde, setzt sich mit diesem Spannungsfeld auseinander [70]. TPM wird als Management von Produktionseinrichtungen verstanden und stellt ein innovatives System zur kontinuierlichen Verbesserung von Produktivität und Qualität für die Produktion dar. Seit Mitte der Achtziger Jahre kommt dieser Philosophieansatz für die Instandhaltungsorganisation in verschiedenen abgewandelten Formen auch in Europa, vor allem in der Automobilindustrie zum Einsatz. Seit erkannt wurde, dass die Effektivität mit der Produktionsprozesse abgewickelt werden zu den Erfolgsfaktoren eines Unternehmens zählen, rückte in Kombination mit der verstärkten Umsetzung von TPM auch die **Gesamteffektivität von Anlagen** in den Mittelpunkt der Betrachtung. Somit wurden entsprechende Kennzahlen auch in die strategische Ausrichtung oder Unternehmensvision integriert. In diesem ursprünglichen Ansatz von Total Productive Maintenance liegt der Hauptschwerpunkt auf der Minimierung des Prozessinputs und der

Maximierung des Prozessoutputs. Jedoch wurde gerade bei der konzeptionellen Umsetzung in Europa und den USA diese Ausführung oft fälschlicherweise als rein quantitativ betrachtet [70].

Mit zunehmendem **Qualitätsbewusstsein** steigt auch die Einschätzung der Bedeutung der Instandhaltung für die erzielbare Produktqualität. Die Verknüpfung, der meist in getrennten funktionalen Einheiten abgebildeten Tätigkeitsfelder Qualitätssicherung und Instandhaltung, erfolgt über die systematische Betrachtung des Produktionsprozesses.

Durch die Bildung des Begriffs einer „**qualitätssichernden Instandhaltung**“ konnten in der Vergangenheit erste Effektivitätssteigerungen erzielt, die Fehlerrate verringert und die Anlageneffektivität gesteigert werden [71].

Zur Steigerung der Gesamteffektivität der Anlagen beschäftigt sich TPM mit der Beseitigung der „sechs großen Verlustquellen“, die ungeheure Hindernisse für die Anlageneffektivität bedeuten [70].

Durch Minimierung der sich ergebenden Beeinträchtigungen aus diesen im folgenden angeführten „**sechs großen Verlustquellen**“ ergibt sich eine Maximierung der Effektivität einer Produktionsanlage [68]:

- Verluste durch Anlagenausfälle
- Rüst- und Einrichtverluste
- Verluste durch Leerlauf und Kurzstillstände
- Verluste durch geringe Taktgeschwindigkeit
- Verluste durch Anlaufschwierigkeiten
- Qualitätsverluste

Um den Einfluss dieser „sechs großen Verlustquellen“ quantifizieren und ein Gesamtmaß für die Effektivität von Produktionsanlagen finden zu können, wird in TPM-Konzepten der Begriff der Gesamtanlageneffektivität geprägt. Im Allgemeinen wird die Gesamtanlageneffektivität auch als „**Overall Equipment Effectiveness (OEE)**“ bezeichnet. Entsprechend der Originaldefinition des japanischen TPM-Konzepts setzt sich der OEE aus den drei Teilkennzahlen Gesamtnutzungsgrad, Leistungsgrad und Qualitätsgrad zusammen [72].

Gesamtanlageneffektivität (OEE) = **[Gl. 3.3-1]**
Gesamtnutzungsgrad x Leistungsgrad x Qualitätsgrad

Bezüglich der Berechnung der einzelnen Teilkennzahlen, gibt es ausgehend von der nach Nakajima entwickelten Systematik, sehr viele abgewandelte Formen um den unterschiedlichen Gegebenheiten gerecht zu werden.

Der Begriff des **Gesamtnutzungsgrads** ist als Verhältnis zwischen der tatsächlichen Laufzeit und der geplanten Belegungszeit zu verstehen. Die Laufzeit berücksichtigt dabei keine Nutzungsnebenzeiten, wie Rüsten oder Justage, sondern bezieht sich rein auf jenes Zeitintervall in der die Maschine tatsächlich arbeitet [68]. Ein solches Verhältnis als Gesamtnutzungsgrad zu bezeichnen, kann jedoch als widersprüchlich angesehen werden, da

hier die geplante Maschinenlaufzeit als Maximalwert angenommen wird und somit den Einfluss der Planungsgüte außeracht lässt. Um sich hier klarer abgrenzen zu können, wird in vielen Fällen dieses Verhältnis aus geplanter Laufzeit und tatsächlicher Betriebszeit als **Anlagenverfügbarkeit** bezeichnet [69].

$$\text{Gesamtnutzungsgrad} = \text{Maschinenlaufzeit} / \text{Planbelegungszeit} \quad [\text{Gl. 3.3-2}]$$

$$\text{Anlagenverfügbarkeit} = \text{tatsächliche Betriebszeit} / \text{geplanten Laufzeit} \quad [\text{Gl. 3.3-3}]$$

Die zweite Teilkennzahl zur OEE-Bestimmung dient zur Berücksichtigung der prozessbedingten Minderung der Ausstoßmengen. Geringere Ausbringungsmengen können auf verringerte Produktionsgeschwindigkeiten oder Leerlauf und kleinere Ausfälle zurückzuführen sein. Im klassischen TPM-Konzept nach Nakajima wird der **Leistungsgrad** als Produkt aus dem Grad der Bearbeitungsgeschwindigkeit und dem Netto-Bearbeitungsgrad bestimmt. Der Grad der Bearbeitungsgeschwindigkeit stellt das Verhältnis zwischen der geplanten Taktzeit der Produktionsanlage und der realen Taktzeit dar [72].

$$\text{Grad der Bearbeitungsgeschwindigkeit} = \text{geplante Taktzeit} / \text{realer Taktzeit} \quad [\text{Gl. 3.3-4}]$$

Der Netto-Bearbeitungsgrad stellt das Verhältnis zwischen der real benötigten Bearbeitungszeit und der Maschinenlaufzeit dar [72].

$$\text{Netto-Bearbeitungsgrad} = \text{reale Taktzeit} \times \text{gefertigter Stückzahl} / \text{Maschinenlaufzeit} \quad [\text{Gl. 3.3-5}]$$

$$\text{Leistungsgrad} = \text{geplante Taktzeit} \times \text{gefertigte Stückzahl} / \text{Maschinenlaufzeit} \quad [\text{Gl. 3.3-6}]$$

Um den Maschinenzustand „Maschine ist unplanmäßig außer Betrieb oder arbeitet auf niedrigem Niveau“, welcher durch den Leistungsgrad beschrieben werden soll, allgemeiner abbilden zu können, kann auch der Begriff der **Anlageneffizienz** verwendet werden. Dazu wird das Verhältnis von tatsächlicher und nutzbarer Betriebszeit gebildet. Die Differenz dieser beiden Werte ergibt sich aus den Themen verringerte Arbeitsgeschwindigkeit, Leerlauf und Kurzstillstände. Diese Definition kann als universeller angesehen werden, da die Bestimmung der einzelnen Zeitbalken an den jeweiligen Produktionsprozess angepasst werden kann. Die TPM-Originaldefinition ist sehr stark an Montageprozessen auf Stückgutbasis orientiert und für beispielsweise Endlosfertigungen nicht unmittelbar umsetzbar [69].

$$\text{Anlageneffizienz} = \text{nutzbare Betriebszeit} / \text{tatsächlicher Betriebszeit} \quad [\text{Gl. 3.3-7}]$$

Der **Qualitätsgrad** beschreibt das Verhältnis aus gefertigten Teilen, die den zu Grunde liegenden Spezifikationen der Produktmerkmalsausprägung entsprechen, und der Gesamtanzahl gefertigter Teile [72]. Die Differenz ergibt sich aus Teilen, die nachgearbeitet werden müssen oder direkt als Ausschuss zu deklarieren sind. Der Grund für Qualitätsabweichungen ist in Prozessfehlern zu sehen. Durch die Produktion von Ausschuss geht Produktivzeit verloren, jedoch bewegen sich Qualitätsverluste im Verhältnis zu den anderen beiden Teilkennzahlen des OEE auf wesentlich niedrigerem Niveau. Es stellt sich

damit die Frage, ob eine reine Betrachtung der Gesamtanlageneffektivität zur Optimierung eines Produktionsprozesses, der heute notwendigen zentralen Qualitätsorientierung entspricht [69].

Qualitätsgrad = [Gl. 3.3-8]
(gefertigte Stückzahl – Stückzahl Ausschuss und Nacharbeit)/gefertigte Stückzahl

Unternehmen, die den japanischen „Productive Maintenance Preis“ gewonnen haben, erzielen typischerweise eine OEE von 85 Prozent. In durchschnittlichen Unternehmen, die ihren Fokus noch kaum auf diese Thematik gelegt haben, liegen die Werte für die Anlageneffektivität zwischen 40 und 50 Prozent [70].

Wie bereits in Zusammenhang mit der Beschreibung des Gesamtnutzungsgrades angemerkt, geht die Berechnung des OEE von einer **geplanten Maschinennutzungszeit** aus. Die Gesamtanlageneffektivität kann also als dafür betrachtet werden, wie effektiv eine Anlage innerhalb der geplanten Bruttozeit betrieben werden kann. Es wird daher oft aus ganzheitlicher Sichtweise der OEE als **Brutto-Anlageneffektivität** bezeichnet. Da Stillstandszeiten, egal ob geplant oder ungeplant, die Rentabilität einer Produktionseinrichtung drücken, sollten auch geplante Maschinenstillstände in die Betrachtung Eingang finden.

Als Maß für die Gesamtproduktivität wird von Hartmann der Begriff „**Total Effective Equipment Productivity**“ (**TEEP**) geprägt. Dabei handelt es sich um eine Beziehung, die sowohl die Anlagenauslastung, als auch die Gesamtanlageneffektivität berücksichtigt. TEEP schließt die gesamten Stillstandszeiten ein und ist ein kombiniertes Maß für die Anlagenauslastung und die Gesamtanlageneffektivität [69].

Nutzungsgrad der Anlage (EU) = [Gl. 3.3-9]
geplante Maschinennutzungszeit / theoretischer Arbeitszeit

TEEP = EU x OEE [Gl. 3.3-10]

Zur Produktivitäts- und Effektivitätsbetrachtung eines Produktionsprozesses ist es also zielführend sich auf **quantitative Ansätze** zu stützen. Um eine datenorientierte Ausformulierung der beschriebenen Kennzahlen durchführen zu können, ist es nötig auf die individuellen Eigenschaften von Produktionsanlagen und der betreibenden Unternehmen einzugehen. Notwendige Unterscheidungen können sich dabei sowohl aus der verwendeten Prozesstechnologie, als auch aus der **organisatorischen Umsetzung** ergeben. Beispielsweise sind die nach Nakajima und Shirose entwickelten OEE-Teilkennzahlen auf Erzeugnisse ausgerichtet, die als Stückgut analysiert werden können. Viele stetige Herstellungsprozesse, vor allem in der Halbzeugindustrie, machen deshalb Anpassungen nötig, um die Anwendbarkeit der Methode zu gewährleisten. Weiters muss auf die zur Verfügung stehende Datengrundlage, die in Unternehmen bereits existiert, Rücksicht genommen werden. Auch eine effiziente **Gruppierung der Verlustquellen** kann einen Mehrwert an Transparenz für den Anwender bieten.

Um die Umsetzung des TPM-Grundgedankens, der Betrachtung der Anlageneffektivität, auf ein praktisches Anwendungsbeispiel in Bezug auf die notwendigen Anpassungen darstellen zu können, sei auf Abbildung 3.3-1 verwiesen. Es handelt sich dabei um eine Visualisierung einer **Arbeitszeitkaskade**, aus welcher sich die relevanten Grundüberlegungen der Effektivitätsbetrachtung einer Produktionsanlage ableiten lassen. Dabei erfolgt eine

Betrachtung der Gesamtanlagenproduktivität, die auf Basis einer vierteiligen Kennzahl abgebildet ist. In Analogie zur TEEP wird durch die erste Teilkennzahl „**Nutzungsgrad**“ das Verhältnis zwischen Maschinenbelegungszeit und theoretischer Arbeitszeit berücksichtigt. Somit wird die sich ergebende Zeitdifferenz geplanter Stillstände berücksichtigt, und die Beurteilung der Anlagenauslastung ist in transparenter Art und Weise möglich. Die weitere Strukturierung der Arbeitszeitkaskade orientiert sich in diesem Beispiel für den Herstellungsprozess längsnahtgeschweißter Edelstahlrohre sehr stark an den Gegebenheiten der Produktionstechnologie und der zugehörigen Verantwortlichkeiten. Die Kategorie „**Ausfälle**“ beinhaltet alle Stillstandszeiten, die sich aus Einrichten und Justage bzw. chronischem oder sporadischem Maschinenversagen ergeben. In der Rohrfertigung sind die Themen Einrichten und Justage immer mit Dimensionswechseln verknüpft. Weiters ist eine klare Abgrenzung zwischen aperiodisch durchzuführenden Tätigkeiten durch den Maschinenbediener und wirklichen Reparaturen auf Grund von Maschinenversagen zu tätigen. Das sich ergebende Verhältnis aus nutzbarer Maschinenlaufzeit und Maschinenbelegungszeit wird als „**Verfügbarkeit**“ bezeichnet und spiegelt damit den gleichen Charakter wie die Begriffe „Gesamtnutzungsgrad“ nach Nakajima und „Anlagenverfügbarkeit“ nach Hartmann wieder. Mittels der Kategorie der „Verluste“ kann transparent gemacht werden, wie effektiv der laufende Produktionsprozess betrieben wird. Dabei finden die Themen Leerlauf, kleiner Ausfälle und reduzierte Arbeitsgeschwindigkeit Eingang in die Betrachtung. Das Management von Nebennutzungszeiten kann dabei klar der Verantwortlichkeit der Produktionsleitung oder der Prozesstechnik zugeordnet werden. Dabei ist es sehr zielführend eine Kategorisierung von standardisierten Verlustkategorien durchzuführen um eine systematische Auswertung der gesammelten Betriebsdaten zu ermöglichen. Somit ergibt sich zur Berücksichtigung der Verluste, der Begriff der „**Einschaltdauer**“ als Verhältnis von Einschaltzeit und nutzbarer Maschinenlaufzeit. Die Einschaltdauer ist teilweise vergleichbar mit dem „Leistungsgrad“ nach Nakajima bzw. der „Anlageneffizienz“ nach Hartmann. Abschließend wird die vierte Teilkennzahl in Analogie zur Literatur als „**Qualitätsgrad**“ bestimmt. Da für den Bereich der kontinuierlichen Rohrfertigung eine Beziehung auf Stückzahlen, durch die Möglichkeit unterschiedlicher Rohrlängen je Stück, schwer realisierbar ist, erfolgt die Verwendung der Einheit „Laufmeter“ als gemeinsame Bezugsgröße.

Auf Basis dieser strukturierten Betrachtung eines Produktionsprozesses, ist es auch viel klarer möglich die Potentiale, die sich aus der Steigerung der Effektivität von Produktionsanlagen ergeben, abzuschätzen. Es handelt sich dabei um eine Vorgehensweise „bottom-up“, da man ausgehend von **Verbesserungen auf Prozessebene** auch die **Produktqualität zu steigern** versucht. Der Hauptfokus liegt somit zwar vordergründig in der Steigerung der Verfügbarkeit und der Leistungsfähigkeit von Produktionsanlagen. Dieses Ziel des optimierten Anlagenzustands kann jedoch nicht als Selbstzweck gesehen werden, sondern muss in qualitativ hochwertige Produkte mit geringsten Ausschussraten münden.

Aus diesem Grund sind auch im TPM-Konzept, welches seinen Schwerpunkt ja auf den Zustand der verwendeten Produktionsanlagen ausrichtet, die Reduktion der Herstellungskosten, die Verbesserung der Produktqualität und die Verringerung der Ausschussraten klar als Zielkriterien definiert [73].

Auf diesen Überlegungen basierend, soll unter Abschnitt 4.3 die quantitative Analyse der Effektivität eines Produktionsprozesses auf Basis der Arbeitszeitkaskade, nach Abbildung 3.3-1, eingesetzt werden.

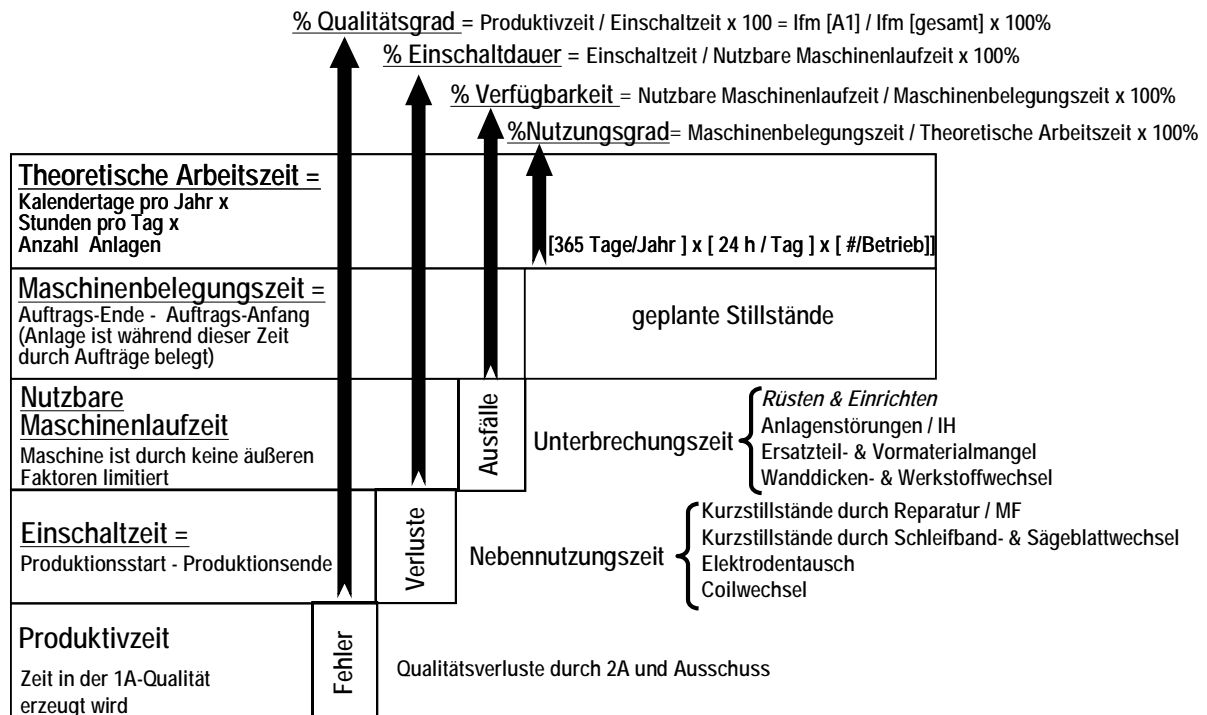


Abbildung 3.3-1: Strukturierte Produktivitätsbetrachtung eines Fertigungsprozesses unter Nutzung der Arbeitszeitkaskade

3.4 Grundlagen der Risikobetrachtung

Es ist allgemein gültig, dass unabhängig vom konkreten Anlassfall, jede Entscheidung mit einer bestimmten Ungewissheit der damit verbundenen Folgen behaftet ist. Dieser Gegebenheit sieht man sich bei der Betrachtung sozialer, ökonomischer, naturwissenschaftlicher und technischer Systeme gegenüber. Die Unsicherheit, die sich aus solchen Situationen ergibt, wird als **Bedrohung oder Gefahr** wahrgenommen und beschrieben. Besonders komplexe Systeme machen die subjektive Einschätzung von Bedrohungspotentialen schwierig. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass der sich ergebende Eindruck über eine Gefahrensituation sehr vom Betrachtungswinkel des Einzelnen abhängt.

Die Bedrohung stellt einen eindimensionalen Begriff dar, da sie nur durch ihre Bedeutung beschrieben wird, z.B. die Schwere eines Unfalls oder die Höhe eines Schadens. Um jedoch einschätzen zu können, mit welcher Aufmerksamkeit ein solches Gefahrenpotential betrachtet werden sollte, muss die Wahrscheinlichkeit des Auftretens in diese Betrachtung einfließen. Genau von diesem Ansatzpunkt geht der **Begriff des Risikos** aus. Der Risikobegriff ist somit eine zweidimensionale Größe, die sich aus der Bedeutung eines eintretenden Ereignisses und der Eintrittshäufigkeit, entsprechend Abbildung 3.4-1, zusammensetzt [55].

Risiken sind somit die, aus der Unvorhersehbarkeit der Zukunft resultierenden, durch zufällige Störungen verursachten Möglichkeiten, von geplanten Zielwerten abzuweichen. Der Risikobegriff ist somit nie unabhängig von den zugrunde liegenden Annahmen zu sehen. In technischen Systemen sind dies beispielsweise die getroffenen Annahmen zur Auslegung von Bauteilen. Vergleichbar können hier für ökonomische Systeme die Planungsgrundlagen wie die Marktentwicklung oder das Kundenverhalten angeführt werden [56].

Das Risiko ist grundsätzlich eine **mathematisch bestimmbare Größe**. Die Instrumente zur Quantifizierung nehmen eine Bewertung von Risiken bezüglich der Kombination von Wahrscheinlichkeit und Auswirkung vor. Eine Methode stellt dabei die statistische Analyse dar, die auf der Auswertung von Vergangenheitswerten beruht [56].

Zur mathematischen Bestimmung des Risikos müssen entsprechende Bezugsgrößen, wie Zeit oder Produktionsmenge, und Quantifizierungskriterien für die Bedeutung, wie Ausschussmengen oder Lieferzeitverzögerungen, entsprechend Gleichung 3.4-1, festgelegt werden [57].

RISIKO [Beeinträchtigung bezogen auf eine Zeiteinheit] = [Gl. 3.4-1]
HÄUFIGKEIT [Ereignisse pro Zeiteinheit] x **BEDEUTUNG** [Beeinträchtigung pro Auftreten]

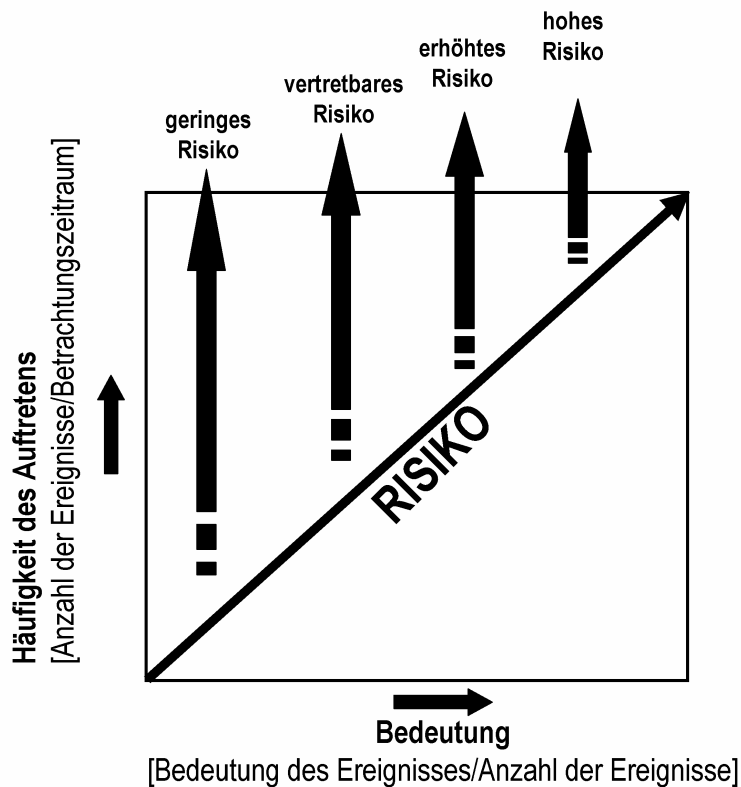


Abbildung 3.4-1: Darstellung des mehrdimensionalen Risikobegriffs

Ansätze zur Risiko-Quantifizierung aus dem Bereich der Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik beruhen auf der Bewertung von Risiken durch Beschreibung mittels geeigneter Dichte- oder Verteilungsfunktion und Zuordnung von entsprechenden Risikomaßen [56].

Die Anwendung von Modellen zur Risikoanalyse ist sehr vielfältig. Ausgehend von dem Bereich Technikfolgenabschätzung und Beurteilung von Katastrophenszenarien fand der Risikobegriff auch zunehmend Eingang in die Betrachtung technischer und sozioökonomischer Systeme. Jedoch ergeben sich bei Anwendung des rein quantitativen Risikobegriffs, welcher vor allem durch die Naturwissenschaften geprägt ist, eine Reihe von **Kritikpunkten**.

Als Problemfelder bei Beurteilung von quantitativen Risikoauswertungen, nach Abbildung 3.4-1, sind der Einfluss einer subjektiven Beurteilung, der individuelle

Interpretationsspielraum, die Ausgrenzung mathematisch nicht erfassbarer Auswirkungen und die Fokussierung auf den Einflussbereich des Betrachters einzuschätzen. Daraus leitet sich sehr häufig die Meinung ab, dass die mathematische Erfassung eines häufig sehr diffusen Risikos nur zur **Scheingenaugigkeit** und zur Fehlannahme, dass das Risiko einschätzbar und beherrschbar wäre, führt [58].

Risikobetrachtungen in Unternehmen sind für stark finanztechnisch dominierte Prozesse durchaus üblich und verbreitet. Diese Prozesse bieten in vielen Fällen gegenüber anderen Abläufen in Unternehmen den Vorteil einer besseren Dokumentation von Daten, die zur Quantifizierung des Risikos benötigt werden. Ein typisches Beispiel für den Einsatz von Risikoanalysen sind Beschaffungsprozesse. Das Prozesscontrolling und Lieferantenmanagement basiert grundsätzlich eher auf Kriterien wie Produktqualität der Zukaufteile, Beschaffungszeiten und Termintreue. Da die Abhängigkeit von einzelnen Zulieferern für viele Firmen zunehmend ein Thema wird, müssen Möglichkeiten gefunden werden um das Risiko, das sich aus der Zusammenarbeit ergibt, zu bestimmen. Trotz der mittlerweile üblichen Abbildung von Beschaffungsprozessen in ERP-Systemen, stellt noch immer die **mangelnde Erfassung und Gliederung von Kosten** zur Bewertung der Bedeutung und Bestimmung der Häufigkeit das zentrale Problem dar. Die Entscheidungsfindungsbasis leidet an Unvollständigkeit; Fehlentscheidungen sind die Folge [59].

In Analogie zu dem Beispiel des Risikomanagements in der Beschaffung muss generell festgehalten werden, dass die **quantitative Bewertung von Risiken** für Unternehmen eine erhebliche Herausforderung darstellt. Dieser Problematik wird versucht, durch Erhöhung von Personalkapazitäten, durch Schaffung eigener Risikomanagementabteilungen entgegenzuwirken. Im Zuge dessen wird in vielen Fällen klar, dass die erforderlichen Daten in der Vergangenheit überhaupt nicht systematisch erhoben wurden und somit für keine statistische Auswertung zur Verfügung stehen. Somit bilden in vielen Fällen **Expertenschätzungen** die Grundlagen des Risikomanagements. Die quantitative Bewertung von Risiken durch Experten wird in vielen Fällen als unbefriedigend angesehen, ist aber letztlich der einzige Ausweg, wenn keine anderen Informationen zur Verfügung stehen [56].

Auf Grund dieser Schwierigkeiten bei der prinzipiell zwar möglichen, aber offensichtlich praktisch schwierigen Risikoquantifizierung, muss auch die Möglichkeit der qualitativen Beschreibung ins Auge gefasst werden. **Qualitative Ansätze zur Risikobetrachtung** zielen darauf ab, mit der Problematik einer fehlenden Datengrundlage und der Pseudosubjektivität von Risikokennzahlen besser umgehen zu können. Ein charakteristischer Anwendungsfall, der die Notwendigkeit dieses Zugangs als plausibel erscheinen lässt, ist die Abschätzung von Risiken in der Produktentwicklung im Fokus des Anwendungszwecks. Besonders dann, wenn es sich um Produkte oder Projekte mit hohem Neuigkeitswert handelt, muss das Risiko zu frühen Zeitpunkten in der Planungs- und Konzeptionsphase abgeschätzt werden, um die richtigen Maßnahmen ableiten zu können. Deshalb wurden gerade im Bereich des präventiven Qualitätsmanagements sehr viele Methoden entwickelt, um das Risiko von Bauteilen, Baugruppen und Produkterstellungsprozessen bereits im Zuge des Engineering systematisch einschätzen zu können.

Die bekannteste und in vielfältiger Weise einsetzbare Methode zur qualitativen Risikobetrachtung ist die **Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)**. Diese Methode wurde Mitte der Sechziger Jahre in den USA im Bereich der Raumfahrt unter dem Namen „Failure Modes and Effects Analysis“ entwickelt, um Fehlerursachen, Fehler und Fehlerfolgen möglichst in einem frühen Projektstadium zu erkennen und so die auftretenden Risiken minimieren zu können. 1972 entwickelte Ford Amerika ein Trainingsprogramm für

Zuverlässigkeit, in das ein FMEA-Arbeitsmodul für die Anwendungsbereiche Konstruktion und Prozess eingebunden waren. Der Teamgedanke wird zum Gelingen einer Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse bei der Anwendung in der Automobilindustrie noch herausgestrichen, da ein **FMEA-Team** sich aus Experten der Bereiche Konstruktion, Fertigung, Montage, Kundendienst und Qualität zusammensetzen soll [60].

Der zentrale Kern der FMEA liegt in der Ermittlung aller erdenklichen Fehler und deren Ursachen in Bezug auf den gewählten Betrachtungsgegenstand. Auf Basis dieser Strukturierung erfolgt eine qualitative Beurteilung der einzelnen Fehler in Bezug auf die Wichtigkeit und die Ableitung entsprechender Maßnahmen. Die durchzuführende Risikobeurteilung in Bezug auf die ermittelten Fehlermöglichkeiten erfolgt durch Bildung der **Risikoprioritätszahl (RPZ)**. Es handelt sich dabei um eine dreiteilige Kennzahl, die sich aus dem Produkt der Einzelrisiken für das Auftreten eines Fehlers, die Nichtentdeckung durch qualitätssichernde Maßnahmen und die Auswirkung für den Verbraucher zusammensetzt. Zur qualitativen Beurteilung der drei Teilrisiken werden jeweils Zahlenwerte auf einer Skala zwischen 1 und 10 vergeben, wodurch sich ein RPZ-Wert zwischen 0 und 1000 ergibt [61].

Die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse verfolgt demnach das Ziel qualitativ bewertete Risiken, durch Verwendung einer **Ordinalskala**, vergleichbar zu machen. Diese Verdichtung vieler Risikoaspekte auf ein skalares Maß, wie es die Risikoprioritätskennzahl darstellt, dient der **Komplexitätsreduzierung**. Somit erhält man auf Basis einer qualitativen Einschätzung, trotzdem als Ergebnis einen Zahlenwert, der die Vergleichbarkeit unterschiedlichster Risiken ermöglicht. Die verwendeten Bewertungsschemata von 1 bis 10 stellen Ordinalskalen dar, in Bezug derer die Einzelrisiken hinsichtlich Eintrittswahrscheinlichkeit und quantitativer Auswirkung zugeordnet werden.

Diese im Zuge der FMEA notwendige Risikobeurteilung, anhand der als Formblätter in praxistaugliche Form gebrachten Ordinalskalen mit zugeordneter Themenkategorisierung, wird als **gruppendynamischer Prozess** gesehen. Durch die Abstimmung größtmöglicher Meinungspluralität in einem mehrköpfigen Team, soll dem Mangel der FMEA, nicht vollständig mathematisch bestimmt zu sein, begegnet werden. Die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse wird, durch die Notwendigkeit der Beteiligung unterschiedlichster Unternehmensbereiche um diese Risikobeurteilung durchführen zu können, nicht nur als Methode des präventiven Qualitätsmanagements betrachtet, sondern auch als Managementinstrument verstanden, welches die interdisziplinäre Zusammenarbeit unterstützen soll [63].

Die Wissensvernetzung bei einer FMEA wird seit Mitte der Achtziger Jahre noch dadurch verstärkt, dass **unternehmensübergreifende FMEA** eingesetzt wird, um das Fehlerrisiko für die eigene Produktion durch mangelhafte Zukaufteile zu verringern [64].

Ausgehend von ihren Wurzeln fand die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse sehr starke Verbreitung im Bereich der Automobilindustrie durch die Einbindung in die Qualitätssicherungsnormen und -regelwerke VDA 6.0 und TS 16949 [54] [62].

In der VDA 6.0 wird eine ganzheitliche Sichtweise der FMEA hinzugefügt. Bis zu diesem Zeitpunkt wurde nur zwischen **Konstruktions- und Prozess-FMEA** unterschieden. Die Konstruktions-FMEA betrachtet nur einzelne Bauteile, etwa das Zahnrad eines Getriebes. Um auch gesamte Baugruppen und Produkte betrachten zu können, wurde der Begriff **System-FMEA Produkt** hinzugefügt. Dabei wird je nach Ziel der Betrachtung eine entsprechende Abgrenzung durchgeführt, z.B. Schaltgetriebe. Somit ist die Konstruktions-FMEA Bestandteil der System-FMEA Produkt, die eine tiefergehende Betrachtung von Bauteilen bis hin zu den Auslegungsdaten darstellt. Die Prozess-FMEA dient zur Untersuchung von Fehlern in Prozessschritten. Analog wurde der Begriff **System-FMEA Prozess** entwickelt, der als

Veränderung gegenüber der klassischen Prozess-FMEA die Analyse der Prozessschritte nach dem Ischikawa-Schema vorsieht [54].

Der Gedanke der abteilungsübergreifenden, teamorientierten Zusammenarbeit im Zuge von Entwicklungs- und Planungsprozessen, wird durch die beiden Regelwerke aus dem Bereich der Automobilindustrie noch dahingehend erweitert, dass durch die wiederkehrende Durchführung von FMEA's eine sukzessive Dokumentation von bereits im Unternehmen vorhandenen **Expertenwissen** erfolgen soll [65].

Wie bereits ausgeführt, hängt der Erfolg der Methodik zur qualitativen Risikobestimmung sehr von der Zusammensetzung des FMEA-Teams ab. Die Ergebnisse einer Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse reagieren sehr sensibel auf eine Veränderung des beteiligten Personenkreises. In Unternehmen mit flacher Hierarchie liegt nicht selten das Detailwissen für die Produkterstellung und die wesentliche Kenntnis des Produkterstellungsprozesses auf Ebene des Produktionspersonals. Gerade die Erhebung dieses Wissens, die Strukturierung und langfristige Sicherung des Know-Hows würde einen messbaren Mehrwert für das Unternehmen darstellen. Ein wesentlicher Kritikpunkt für den konkreten Einsatz der Methode FMEA ist die **hohe Zeitintensität**, welche die beschriebene Mitarbeitergruppe, deren Mitwirken essenziell für das Gelingen ist, als ausschließendes Kriterium auf Grund der starken Bindung in der Linienfunktion wahrnimmt.

Auf Grund ihres Charakters fordert die FMEA eine objektive, der Realität entsprechende Bewertung der Fehler und ihrer Risiken. Für Konstrukteure und Prozessplaner, die in einem FMEA-Team eingebunden sind, bedeutet dies, dass sie ihre eigenen Entwicklungen kritisch betrachten müssen. Dies fällt den handelnden Personen naturgemäß schwer, was zu einer starken **Verfälschung der Ergebnisse** führen kann [66].

Verstärkt wird dieser Effekt noch dadurch, dass die drei Teilkennzahlen der Risikoprioritätszahl mittels unabhängig vom betrachteten Prozess oder Produkt entwickelten Bewertungstabellen lt. VDA, zur Abbildung eines Zuordnungsschemas in Bezug auf die genormte Ordinalskala von 1 bis 10, ermittelt werden sollen. Durch die nicht auf den Anwendungsfall abgestimmte Beschreibung der Bewertungskriterien ist eine Einschätzung für das FMEA-Team oft schwierig und zeitintensiv. Aus diesem Grund ist es mittlerweile durchaus üblich die **Bewertungstabellen** auf die Erfordernisse des jeweiligen Anwendungsfalles anzupassen, jedoch beschränkten sich die meisten Unternehmen dabei auf die dritte Teilkennzahl der RPZ, die Bedeutung des Fehlers für den Kunden. Für die Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit werden meist die in der Literatur verbrieften Kriterien übernommen.

Die **Interpretation** der Ergebnisse einer Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse und die Ableitung eines entsprechenden Verhaltens bereitet vor allem für Themenbereiche Schwierigkeiten, die mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit und drastischer, unmittelbar wirksamer Schadensfolge bei Eintreten verknüpft sind. Ein typisches Beispiel für einen solchen Fall ist eine Feuerbrunst im Bereich der Produktionseinrichtungen, was über 70% aller Firmen in den Konkurs zwingt, obwohl sie gegen Feuer versichert sind. Der Risikobegriff kann für solche, unmittelbar wirksame Ereignisse um eine Größe, die den Überraschungseffekt berücksichtigt, erweitert werden. Als Maß für den Überraschungseffekt, kann beispielsweise die Vorwarnzeit eines Ereignisses, ehe es zur vollen Wirksamkeit gelangt, verwendet werden [67].

Es können also folgende **Problemfelder** für die Anwendung von qualitativen Methoden des Risikomanagements, wie es die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse darstellt zusammengefasst werden:

- **hohe Zeitintensität** für die Durchführung
- **Subjektivität** der Beurteilung auf Grund persönlicher Befangenheit der Mitglieder eines FMEA-Teams
- **Sensibilität der Ergebnisse** auf personelle Veränderung des FMEA-Teams
- Risikobeurteilung auf Grund der Anwendung **standardisierter Bewertungsskalen** oft nicht zielführend
- Ableitung adäquater Verhaltensregeln und Maßnahmen für Ereignisse an den **Randbereichen von Risikokurven** (hohe Bedeutung bei geringer Auftrittswahrscheinlichkeit / geringe Bedeutung bei hoher Auftrittswahrscheinlichkeit)

Die sich ergebende Unsicherheit hinsichtlich der Ergebnisse der FMEA, lässt die Methode speziell im Bereich **Klein- und mittelständischer Unternehmen (KMU)** oft mehr als Risiko und ungerechtfertigter Aufwand erscheinen. Gerade in Unternehmen, die stark kundenorientiert sind und hinsichtlich der Bedürfnisse des Kunden große Flexibilität an den Tag legen, ist es schwierig, eine qualitative Methode einzusetzen, da diese einer umfangreichen Meinungsbildung bedarf, welche aber im Zuge kurzfristiger Entscheidungen oft nicht möglich ist. Insbesondere bei KMU's sind die Ergebnisse einer FMEA als kritisch zu betrachten, da meist die nötige Mitarbeiterzusammenführung nicht gelingt. Dadurch nimmt die Aussagekraft der erlangten Ergebnisse drastisch ab.

Grundsätzlich sollte trotz der genannten Probleme auf eine **Quantifizierung der Risiken** keinesfalls verzichtet werden. Eine Quantifizierung der Risiken ist eine notwendige Voraussetzung, um Risiken untereinander vergleichen zu können und die möglichen Konsequenzen für das Unternehmen und seine Ziele einzuschätzen. Auch bieten quantitativ errechnete Einzelrisiken die Möglichkeit der **Risikoaggregation** zur Bestimmung eines Gesamtrisikos. Diese Zielsetzung stammt aus dem Bereich der Betrachtung finanzökonomischer Risiken, büßt jedoch für die Umlegung auf produktionstechnische Zusammenhänge nichts an seiner Aussagekraft ein [56].

Aus den beschriebenen Gründen ist die Anwendung qualitativer Werkzeuge zur risikogestützten Analyse von Produkten und Prozessen speziell in Klein- und mittelständischer Unternehmen als kritisch zu betrachten. Um der Notwendigkeit zur Durchführung einer solchen Analyse trotzdem nachkommen zu können, bedarf es der **Entwicklung eines Instrumentariums**, welches die Vorteile der qualitativen und quantitativen Risikobestimmung miteinander verbindet. Dabei soll die Strukturierung des Risikos in mehrere Teilbereiche, wie es die FMEA vorsieht und welche sich als durchaus zielführend für den Bereich der Produkterstellung erweist, erhalten bleiben. Die Bestimmung der Teilkennzahlen soll jedoch auf quantitativer Basis und nicht mittels Zuordnung zu Ordinalskalen erfolgen. Somit gilt es jedoch, das Thema Bereitstellung einer entsprechend **auswertbaren Datenbasis** in praxistauglicher Weise zu lösen und damit den zentralen Nachteil der quantitativen Methoden zur Risikobestimmung in den Griff zu bekommen. Die

Systematik der FMEA auf eine quantifizierbare Basis aufzusetzen, wird durch die in Abschnitt 4.3 beschriebene Methodik, abgebildet und unter verschiedenen Gesichtspunkten dargestellt.

4 Konzeption einer Risikobetrachtung eines Rohrherstellungsprozesses

4.1 Chancen- und Gefahrenbetrachtung Produkt

Hersteller von Halbzeugen in Europa und den USA sehen sich einem reduzierten relativen Marktwachstum und erhöhtem Preisdruck ausgesetzt. Um sich als Unternehmen der Rohrindustrie unter diesen geänderten Bedingungen behaupten zu können, bedarf es einer strukturierten Analyse der eigenen Position innerhalb des Marktes und eines Abgleichs mit dem Fokus des Kunden in Bezug auf das Endprodukt, um daraus Entscheidungshilfen für die normativ-strategische und operative Ebene ableiten zu können. Die gezielte Positionierung in einer Marktnische unter den beschriebenen Marktmechanismen, wie es die Umorientierung von der Quantität zur Qualität darstellt, kann nur unter Betrachtung der Chancen, die ein Produkt für das Unternehmen bietet, und der Gefahren, die mit der Belieferung eines Kundensegments verbunden sind, erfolgen.

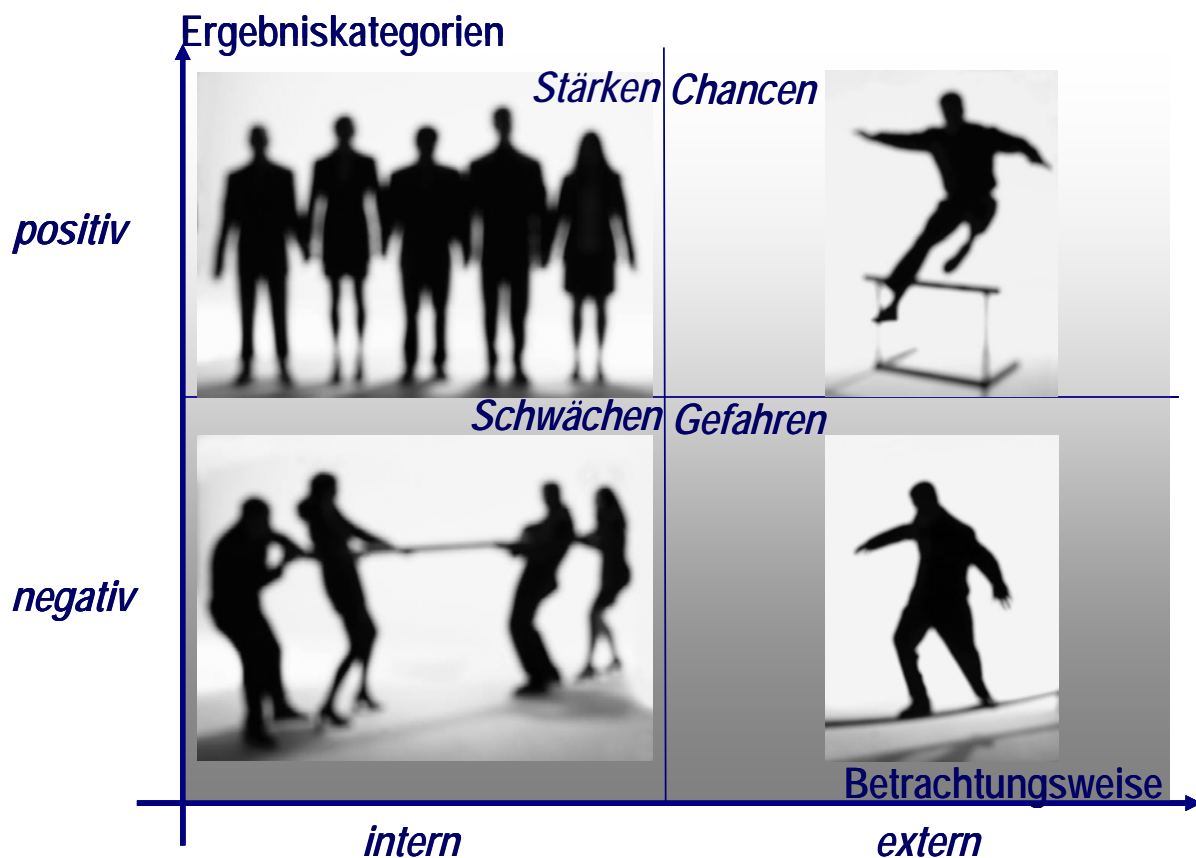


Abbildung 4.1-1: Strukturierungsmatrix zur Beurteilung von Stärken und Schwächen der verwendeten Fertigungstechnologie im Vergleich zu Chancen und Gefahren neuer Produkte für das Unternehmen

Die Begriffe **Chancen und Gefahren** dienen zur Abbildung der **extrinsischen Sichtweise** und stellen somit die Stimme des Kunden dar. Zur Umsetzung einer verstärkten **Kundenorientierung** auch für den Sektor der Halbzeugindustrie, wie es die Edelstahlrohrfertigung darstellt, bedarf es einer strukturierten Berücksichtigung der Kundenanforderungen, welche sich auch in der Entwicklung des Marktes niederschlagen. Um dies effizient für diesen Bereich durchführen zu können, werden in den folgenden beiden Abschnitten 4.1.1 und 4.1.2 methodische Hilfsmittel beschrieben, die die praktische Abbildung von Chancen und Gefahren möglich machen. Da die Darstellung der Anwendbarkeit dieser Methoden für einen stark dynamisch veränderlichen Markt, wie es in den letzten Jahren Europa darstellt, sehr gut möglich ist, wird vor allem die Umorientierung der Quantität hin zur Qualität unter dem Motto „Vom reinen Halbzeug hin zum kundenorientierten Qualitätsprodukt“ näher beschrieben.

4.1.1 Produktbezogene Chancenbetrachtung

Um den Produktionsstandort Europa für die Herstellung von geschweißten Edelstahlrohren zu sichern, ist es nötig, das Edelstahlrohr vom reinen Halbzeug näher an die individuellen Anforderungen des Endprodukts für unterschiedliche Anwendungsbereiche, wie beispielsweise die Automobilindustrie, den Anlagenbau, die Nahrungsmittelindustrie, die Sanitärinstallationsindustrie und den Wärmetauscherbau, zu bringen um somit Fertigungsschritte reduzieren und die Wertschöpfung erhöhen zu können. Diese Entwicklungsnotwendigkeiten haben jedoch zur Folge, dass es zunehmend zu einer Entfernung vom Standardprodukt auf Basis bestehender Normen und technischer Regelwerke kommt. Für die Produkterstellung bedeutet dies zunehmend die Ausschöpfung verfahrensbedingter Grenzbereiche. Durch die dadurch bedingten steigenden Stückkosten ist es notwendig klare Aussagen treffen zu können, inwieweit ein Produkt langfristig zum Unternehmenserfolg beitragen kann. Um die Chance, die ein Produkt für einen Rohrhersteller bieten kann, abschätzen zu können, eignet sich die folgenden Methodik zur **Differenzierung einzelner Produktmerkmale** des längsnahtgeschweißten Edelstahlrohres und deren Interaktionen, und dient somit zur Abbildung der Sichtweise des Kunden.

Zur Bestimmung der grundsätzlichen Ausrichtung eines Rohrproduzenten bietet sich eine grundlegende **Analyse der Kundenzusammensetzung** an, wie unter Abbildung 4.1.1-1 dargestellt. Die Gliederung der Marktsegmente, nach den unter Abschnitt 3.2 beschriebenen Hauptrohrarten, kann dafür als grundsätzliche Richtlinie zur Zuordnung von Kunden zu einzelnen Marktsegmenten verwendet werden. Natürlich ist es notwendig auch die innerbetriebliche Sichtweise, z.B. in Bezug auf die Bedeutung der Kunden, bei einer solchen Segmentierung zu berücksichtigen. In diesem ersten Schritt soll die Untergliederung rein auf Basis der Marktvolumina erfolgen. Als Bezugsgröße kann hier entweder die zuordenbare Tonnage oder die Laufmetermenge verwendet werden. In der Regel ist hier die Abstimmung mit den in Unternehmen verwendeten Bezugsgrößen zu suchen. Hersteller von Großrohren und Rohrerzeuger mit einer großen Bandbreite an gefertigten Produkten arbeiten zumeist mit der Einheit Tonnen. Allerdings ist es auch sehr verbreitet, für die Erzeugung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren die Bezugsinheit Laufmeter oder Meter zu verwenden. Dabei wird in der Regel ein mittleres Laufmetergewicht für das gefertigte Produktportfolio eines Durchrechnungszeitraums bestimmt und zur Berücksichtigung des Materialeinsatzes der produzierten Menge in Metern ergänzend gegenübergestellt. In den weiteren Ausführungen wird als Bezugsgröße die Einheit Meter bzw. Laufmeter verwendet.

Die Verteilung der Marktsegmente in Abbildung 4.1.1-1 wurde in Analogie zu Abbildung 3.2-5 für ein vitales Unternehmen der europäischen Rohrindustrie entsprechend der durchschnittlichen Marktanteile angenommen. Dies ist, wie bereits im ersten Abschnitt dieses Kapitels ausgeführt, sehr gut am geringen Anteil von Konstruktionsrohren für dekorative Zwecke und dem hohen Anteil an Rohren für Sonderanwendungen zu erkennen. Eine solche Analyse des Produktportfolios eines Herstellers von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren bietet sich traditionell für den Abgleich mit externen Daten aus **Marktanalysen** an. Aus dem Vergleich der Mengenanteile einzelner Kundengruppen mit den zugehörigen Marktsegmenten, sowie den Prognosen über die Zukunftsträchtigkeit und Entwicklung dieser Sparten werden sehr oft langfristig bedeutsame, strategische Entscheidungen getroffen. Vernachlässigt man den Einfluss der Qualität externer Daten und Markterhebungen auf die Entscheidungsgrundlagen, so ist trotzdem klar erkennbar, dass bei einem rein mengenmäßigen Vergleich, wesentliche Aspekte für eine zukunftsträchtige Ausrichtung einer Rohrfertigung vernachlässigt werden. Im Sinne des Magischen Dreiecks müssen die Begriffe Qualität, Kosten und Zeit in diese Betrachtung miteinbezogen werden.

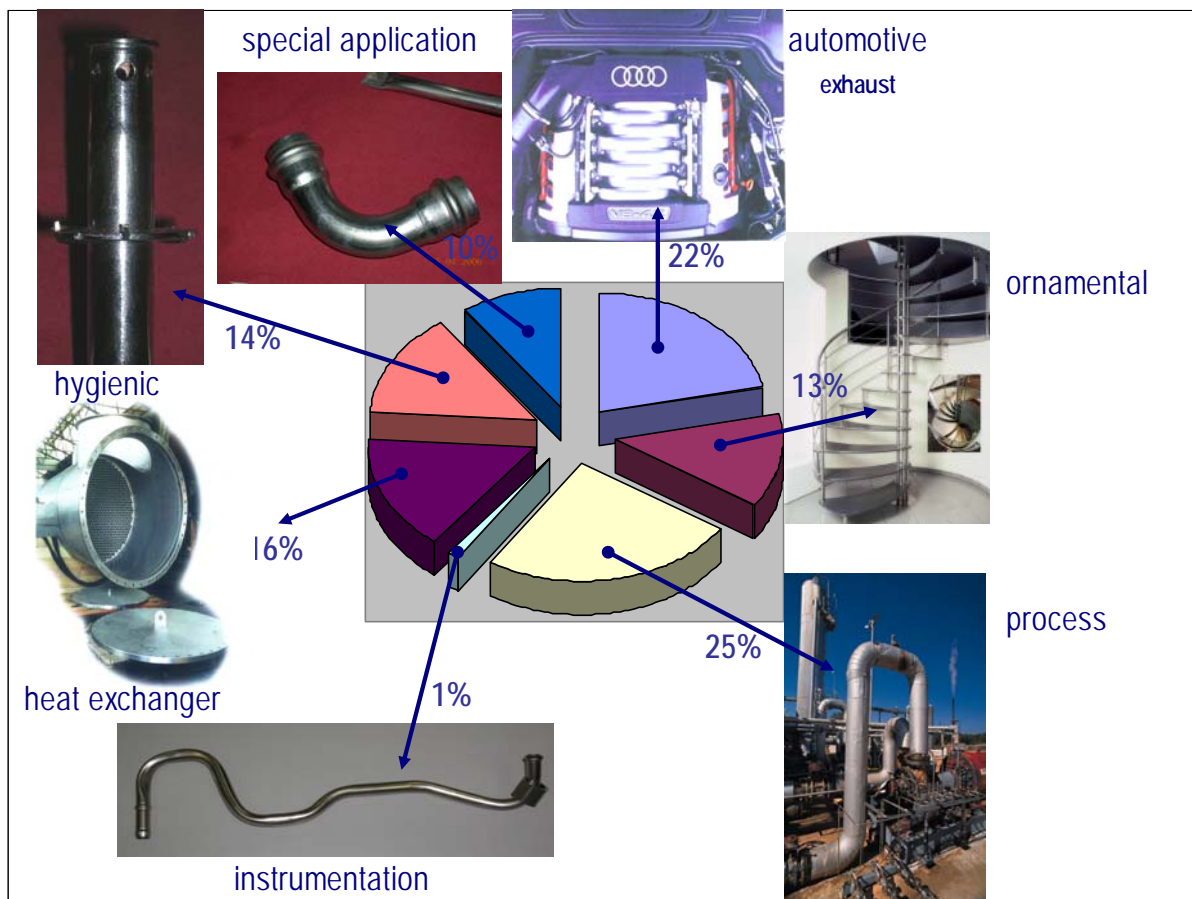


Abbildung 4.1.1-1: Segmentierung des Kundenstammes eines Rohrherstellers nach den Hauptrohrarten

Aus diesem Grund sollte die gezielte Segmentierung der Kunden nach Marktsegmenten nicht nur zur oberflächlichen, reinen mengenmäßigen Betrachtung dienen, sondern um eine **strukturierte Darstellung der Kundenanforderungen** erweitert werden. Wie bereits unter Abschnitt 3.2 beschrieben, erfolgt die Fertigung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren in der Regel auf Basis einer gültigen Produktnorm. Die Produktmerkmale, welche durch Kunden aus verschiedenen Segmenten gefordert werden, werden auf Basis dieser Produktnormen definiert. Da die Funktion des Edelstahlrohres, welche für die Endanwendung von Nöten ist, trotz der Vielzahl an Produkten innerhalb eines Marktsegmentes eine sehr ähnliche ist, lässt sich sehr gut ein gemeinsamer Nenner finden. In der Regel wird für die Bestellspezifikation von Edelstahlrohren im Zuge der Beschaffungsabwicklung, sowohl die Produktqualität an Hand charakteristischer Merkmale, wie der Außendurchmesser- oder Wanddickentoleranz als auch die zu verwendende Produktnorm festgelegt. Auf dieser Basis ist es für einen Rohrhersteller relativ einfach möglich, die **Verknüpfung zwischen bedienten Marktsegmenten und geforderten Produktnormen** herzustellen. Somit wird ein erster Zugewinn an Informationstiefe für die Betrachtung der Kundensegmentierung erreicht. Es handelt sich dabei um einen Zwischenschritt, um den Begriff der Qualität genauer beschreiben und so Unterschiede zwischen den Hauptrohrarten berücksichtigen zu können. Diese **Zwischenebene** dient in weiterer Folge dazu vor allem für die Entscheidungsfindung einen transparenten Überblick bieten zu können, ohne jedes einzelne Produkt mit großem technischem Tiefgang der Rohrherstellung betrachten zu müssen. Eine typische Aussage, die sich aus dieser Zuordnung ableiten lässt ist: „Konstruktionsrohre für dekorative Anwendungen (ornamental) werden ausschließlich nach DIN 17455 gefertigt, während Rohre für Sonderanwendungen oder Steuerleitungen für druckbeaufschlagte Anwendungen auf Basis der DIN 17457 produziert werden.“ Da für die Rohrherstellung nach diesen beiden Produktnormen teilweise grundlegend andere Fertigungstechnologien verwendet werden müssen, kann die Zusammensetzung des Maschinenparks in Bezug auf die zukünftige Ausrichtung überprüft werden. Ähnliche grundlegende Überlegungen können helfen bei der Ausarbeitung von Entwürfen für mögliche zukünftige Strategien. In Abbildung 4.1.1-2 ist dieses Gedankenmodell der Verknüpfung von Marktsegmenten und Produktnormen als **Baumstruktur** dargestellt. Der Baum versinnbildlicht das Unternehmen, dessen Wachstum von der über die Blätter aufgenommenen Energie abhängt. Die Blätter symbolisieren aus diesem Grund die Kunden in einzelnen Marktsegmenten, durch die der wirtschaftliche Erfolg des Unternehmens sichergestellt wird. Bäume können vielerorts auf gleichem Grund aufgehen und sich völlig anders entwickeln, ähnlich sind Betriebe in der Halbzeugindustrie zu sehen. Sie fertigen alle auf Basis derselben Produktnorm und haben somit, was das Produkt betrifft, ähnliche Rahmenbedingungen, wie jedoch diese zur Befriedigung der Kundenbedürfnisse genutzt werden, stellt den unternehmerischen Freiraum dar. Aus diesem Grund ist der Baum über seine Wurzeln in den unterschiedlichen Normen und technischen Regelwerken, die den Boden darstellen, verwurzelt.

Auf normativer und strategischer Ebene von Unternehmen genügt sehr oft die Informationstiefe, die durch diese **Aufbereitung vorhandener Daten** erlangt werden kann. Operative Fragestellungen, beispielsweise über die Machbarkeit eines Produkts für die Entscheidung der Annahme eines Produktionsauftrags, bedürfen oft einer tiefer gehenden technologischen Betrachtungsweise. Um für diese praktische Anforderung Antworten generieren zu können, ist eine Aufbereitung der verwendeten Produktnormen nötig und liefert als Ergebnis eine Gliederung der einzelnen Qualitätsmerkmale und ihrer hierarchischen Abhängigkeiten, welche im weitern als **Normenstrukturbaum** bezeichnet werden soll.



Abbildung 4.1.1-2: Gruppierung von Qualitätsmerkmalen für längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre auf Basis der Produktnormen nach Marktsegmenten

In Abbildung 4.1.1-3 ist der Normenstrukturbaum für die Produktnorm DIN 17457 „Geschweißte kreisförmige Rohre aus austenitischen Stählen für besondere Anforderungen“ dargestellt. Bei der Ableitung dieser Darstellungsform steht vor allem die **Erhöhung der Transparenz** und der Verständlichkeit eines solchen technischen Normenwerks im Mittelpunkt. Ausgehend von der exakten Bezeichnung der Produktnorm, sind die Qualitätsanforderungen, welche durch das Regelwerk gestellt werden, in Ebenen gegliedert dargestellt. Auf der höchsten Ebene erfolgt die Abbildung der **Hauptbetrachtungsbereiche** der Norm, was den Hauptabschnitten des Regelwerks entspricht. Jedes Feld steht dabei für einen solchen Abschnitt und ist mit einem Großbuchstaben als Feldindex bezeichnet. Um die eindeutige Verknüpfung zur Produktnorm sicherzustellen, wird die Absatznummer in runder Klammer unmittelbar nach dem Feldindex angegeben. Jedes Feld trägt den Namen des zugehörigen Hauptabschnitts.

Mit jedem Schritt, mit dem man sich nun zu tieferen Ebenen entlang des Normenstrukturbaums bewegt, erhöht man entsprechend den **Detaillierungsgrad** der Beschreibung eines Qualitätsmerkmals. Auch hier erfolgt die Bezeichnung der einzelnen Normvorgaben mittels Feldindex, Absatznummer und Abschnittsbezeichnung.

Bezüglich der **Themenzuordnung unter der Hauptebene** kann vom starren Aufbau des Normenwerks abgegangen werden, wenn dadurch die Übersichtlichkeit und Geschlossenheit des Normenstrukturbaums erhöht werden kann. Beispielsweise ist die Beschreibung der

Ausführung der Schweißnahtwurzel nach Absatz 3.8.6 laut DIN 17457 dem Hauptabschnitt „Ausführung und Aussehen der Oberfläche und Schweißverbindung“ zugeordnet. Somit müsste das Feld „[D.3] (5.8.6) Wurzelüberhöhung“ dem Hauptbetrachtungsbereich D zugeordnet werden. Aus technologischer Sicht ist die Ausprägung der Schweißnahtwurzel eines längsnahtgeschweißten Edelstahlrohres durch die Vorgabe von Maßtoleranzen zu beschreiben, womit die Zuordnung zu Punkt D über Ausführung und Aussehen der Oberfläche als nicht stimmig anzusehen ist. Die Ausführung und das Aussehen eines Edelstahlrohres werden wesentlich durch die Qualität des verwendeten Ausgangsbandes bestimmt, sodass die Produktnorm unter Absatz 5.8 hauptsächlich die Art des zu verwendenden Edelstahlblechs definiert. Die Ausführung der Schweißverbindung jedoch, und damit auch der Schweißnahtwurzel, wird durch den Prozessschritt Rohrfertigung selbst bestimmt und ist somit sinngemäß dem Hauptbetrachtungsbereich „[F] (5.11) Maße, längenbezogene Masse und zulässige Abweichungen“ zuzuordnen.

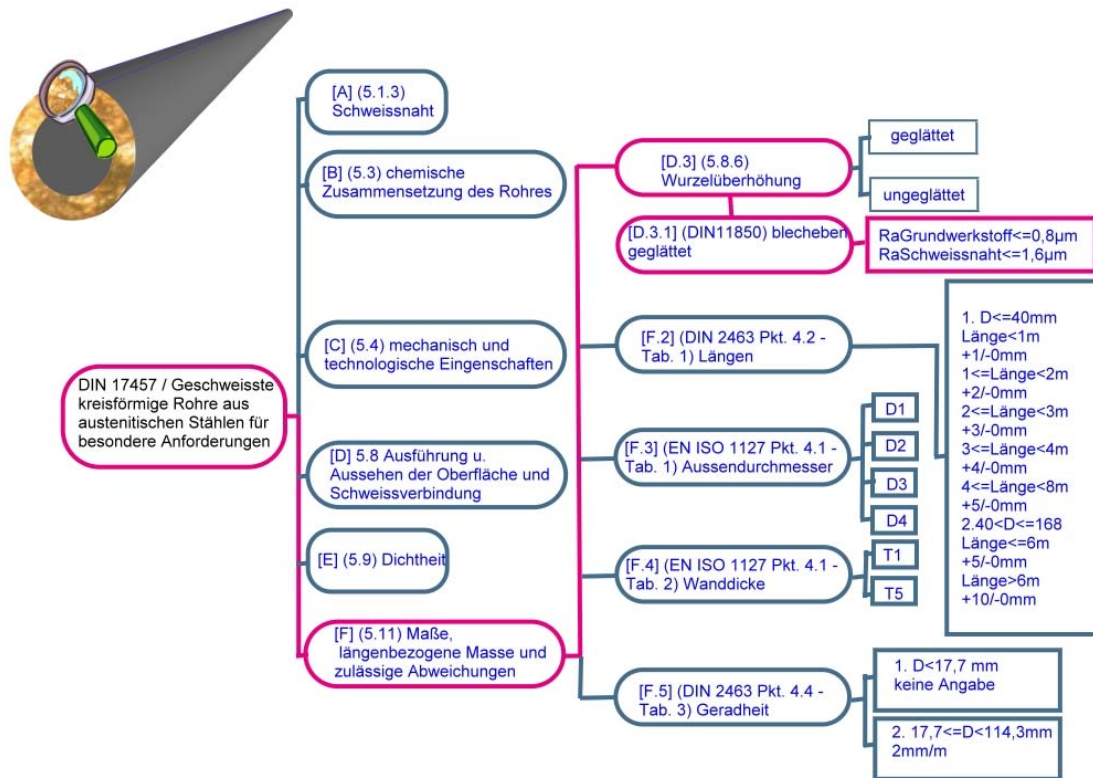


Abbildung 4.1.1-3: Normenstrukturbaum nach DIN 17457 „Geschweißte kreisförmige Rohre aus austenitischen Stählen für besondere Anforderungen“

Betrachtet man das magentafarbig hinterlegte **Beispiel**, der Erhöhung der Detailtiefe entlang des Normenstrukturbaums, in Abbildung 4.1.1-3, so wird auf einen Blick, ohne zeitaufwendiges Normenstudium, deutlich, dass die zu betrachtenden Qualitätskriterien, in Bezug auf die geometrischen Abmessungen entsprechend Feld F, die Wurzelüberhöhung [D.3], die Rohrlänge [F.2], der Außendurchmesser [F.3], die Wanddicke [F.4] und die Geradheit [F.5] eines Rohres darstellen. Der Nutzen für den Anwender kann durch die Einbindung entsprechender **Normverweise** zur Beschreibung von Qualitätskriterien deutlich erhöht werden. Viele Produktnormen verweisen in Bezug auf die Definition von Toleranzklassen auf andere Normen. Beispielsweise verweist die DIN 17457 zur Festlegung der Toleranzklassen für Außendurchmesser und Wanddicke auf die EN ISO 1127. Bezüglich

der genaueren normativen Zusammenhänge sei auf Abschnitt 3.2 und Tabelle 3.1.2-1 verwiesen. Die Abbildung des beschriebenen Beispiels eines Normverweises ist in den Feldern F.3 und F.4 des Normenstrukturbaums zu finden. Entsprechend Abschnitt 3.2 werden die allgemeinen Produktnormen für die Fertigung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren in einigen Fällen durch produktspezifische, technische Regelwerke oder Produktnormen ergänzt. Auch die Abbildung solcher Ergänzungen sollte im Normenstrukturbaum Platz greifen, da in vielen Fällen so die **detailliertere Ausformulierung von Qualitätsmerkmalen** möglich ist. Entsprechend wird in Abbildung 4.1.1-3 die Kategorie „[D.3] (5.8.6) Wurzelüberhöhung“ durch die Beschreibung laut der Produktnorm DIN 11850 „Rohre für Lebensmittelindustrie, Chemie und Pharmazie“ über das Feld [D3.1] ergänzt.

Neben der Erhöhung der Transparenz in Bezug auf die verwendeten Normen und Regelwerke, die es für die Erzeugung von geschweißten Edelstahlrohren zu berücksichtigen gilt, bietet der Normenstrukturbaum vor allem den Vorteil, dass jedes Qualitätsmerkmal bis auf **quantitativ messbare Größen** wie Rauigkeit, geometrische Abmessungen, etc. heruntergebrochen werden kann.

Betrachtet man nun die Verknüpfung zwischen Qualitätsmerkmalen aus spezifischen Kundenanforderungen und verwendeter Produktnorm, sowie die Beschreibung der Produktnorm durch messbare Kriterien laut Normenstrukturbaum, so lässt sich eine direkte Beziehung zwischen Qualitätsanforderung an das Produkt und dessen quantitativer Ausprägung nachweisen. Führt man nun die **Rückwärtsintegration der Qualitätsmerkmale** einzelner Produkte, unter Zuhilfenahme des Werkzeugs Normenstrukturbaum, durch und gruppiert diese entsprechend der Marktsegmente laut Abbildung 4.1.1-2, so kann erhoben werden, wie weit die Anforderungen entsprechend der Produktnorm ausgeschöpft oder überschritten werden. Somit bieten sich erste Ansatzpunkte für Überlegungen, welche Bedeutung einzelne Produktmerkmale für den Fertigungsprozess der nächsten Wertschöpfungsstufe oder die Anwendung im Endprodukt haben. Diese Vorgehensweise gibt auch Aufschluss darüber, in welchen Bereichen man sich am Rande **technologischer Grenzen** für die Herstellung oder Weiterverarbeitung eines längsnahtgeschweißten Edelstahlrohres befindet. Es kann somit auch gezielt, aktiv in den Dialog mit Kunden eingetreten werden, um die Bedeutung, die einzelne Produktmerkmale für die Funktion des Endprodukts haben, hinterfragen und gezielt modifizieren zu können.

Das **Verknüpfungsglied** zwischen der technologisch tief greifenden Analyse des **Normenstrukturbaums** und den allgemein gehaltenen Beschreibungen der Anforderungen verschiedener **Marktsegmente** stellt die **Qualitätsmerkmalsstruktur** dar.

Der Begriff der Qualitätsmerkmalsstruktur hat große Ähnlichkeit mit der Bedeutung der Systemstruktur, wie sie im Zug der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) verwendet wird. Sie stellt die Grundlage für die differenzierte Betrachtung hinsichtlich Funktion und Fehlfunktion einzelner Qualitätsmerkmale dar. Bezüglich einer ausführlicheren Beschreibung von Methoden des präventiven Qualitätsmanagements wie der FMEA sei auf Abschnitt 3.4 verwiesen [54].

Das Grundproblem für eine strukturierte Analyse des Edelstahlrohrs, wie für viele andere umformtechnisch erzeugte Produkte auch, liegt darin, dass es sich um einen physisch nicht mehr weiter zerlegbaren Gegenstand handelt. Bei teilbaren Produkten, die sich aus Baugruppen und Einzelteilen zusammensetzen, kann auf Basis von bestehenden Stücklisten einerseits die Zusammensetzung nachvollzogen und andererseits die Funktion jedes einzelnen Bauteils für das Gesamtkonstrukt beurteilt werden. Mittels der Qualitätsmerkmalsstruktur, wie in Abbildung 4.1.1-4 dargestellt, kann diese methodische Lücke für **einteilige Produkte** geschlossen werden. Die Qualitätsmerkmalsstruktur ist in ihrer Gesamtheit nur an einer

grundlegenden Frage orientiert: „Welche Qualitätsmerkmale werden laut der angewendeten Produktnorm oder technischen Liefervorschrift des Kunden definiert und in welcher Weise tragen diese zur Funktionserfüllung beim Endkunden bei?“.

Produkt	Qualitätsmerkmalsstruktur	Funktionsbeitrag	Qualitätsmerkmale	Quantitative Beschreibung des Qualitätsmerkmals
<p>Marktsegment: „Sonderanwendungen“</p> <p>Geschweißtes kreisförmiges Rohr aus Mo-legierten, austenitischen Stählen zur Herstellung von Pressfittingen nach DVGW</p>	<p>-Allgemein</p> <p>-Ausrichtung</p> <p>-Länge</p> <p>-Oberfläche</p> <p>-Rohrquerschnitt</p> <p>-Schweißnaht</p>	<p>Schweißnahtwurzel gewährleistet die Dichtfläche für den O-Ring des Fittings</p>	<p>Produkt-norm(en): DIN 17457</p> <p>[D.2] (Tab.6) Oberflächenbeschaffenheit</p> <p>[F.4] (DIN 2463 Pkt. 4.3 –Tab.2) Wanddicke / [D.3] (5.8.6) Wurzelüberhöhung</p>	<p>max. zulässige Rauigkeit an der Schweißnaht innen Ra_{w-innen} ≤ 1,6µm</p> <p>max. zulässige Wurzelüberhöhung ΔS=0,02mm</p> <p>Einhaltung der Wanddickentoleranz +0 / -0,22mm</p>

Abbildung 4.1.1-4: Qualitätsmerkmalsstruktur am Anwendungsbeispiel Fittingrohr

In Abbildung 4.1.1-4 ist das Schema einer Qualitätsmerkmalsstruktur für ein Anwendungsbeispiel aus dem Marktsegment „Sonderanwendungen“ dargestellt. Es handelt sich dabei um längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre, die für die Fertigung von **Pressfitting**s zur Verbindung von Trinkwasserleitungsrohren verwendet werden. Die Abbildung zeigt schematisch den Aufbau eines **Formblattes** zur Beschreibung der Qualitätsmerkmalsstruktur eines Edelstahlrohres. Um geschlossene Datensätze zu erhalten, soll dabei, sowohl das Marktsegment als auch eine detailliertere Beschreibung angegeben werden. In vielen Fällen ist auch der Verweis auf einzelne Kunden durchaus sinnvoll. Die zweite Spalte zeigt den Aufbau der Qualitätsmerkmalsstruktur, nach welchem die Analyse von geschweißten Edelstahlrohren durchgeführt werden kann. Durch diese Gliederung können Qualitätsmerkmale zusammengefasst und gruppiert werden. Der **Aufbau dieser Struktur** ist speziell auf längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre abgestimmt, wobei die Zuordnung der einzelnen Qualitätsmerkmale sich an der Gliederung der Produktnormen, der praktischen Erfassbarkeit von Messwerten und der Beutung von typischen Kriterien orientiert.

Basierend auf dieser grundsätzlichen Gliederung der Qualitätsmerkmalsstruktur ist es möglich gezielt den **Funktionsbeitrag der Qualitätsmerkmale** für die Anwendung zu beschreiben. Beispielhaft ist hier die Qualitätsmerkmalsgruppe „Schweißnaht“ hinsichtlich ihres Funktionsbeitrags für die Erzeugung von Pressfittingen beschrieben. Das Prinzip eines solchen Pressfitting besteht darin, zwei oder mehrere Leitungsrohre zu verbinden und dabei ein Austreten von Medium zu verhindern. Dabei unterscheidet er sich vom konventionellen Schweißfitting dadurch, dass die Rohre nur in den Fitting gesteckt und mittels einer geeigneten Presszange formschlüssig miteinander verbunden werden müssen. Durch die plastische Verformung des Pressfitting wird ein sich im Inneren befindlicher O-Ring auf die Außenoberfläche des Leitungsrohres gedrückt und somit die Dichtigkeit der Verbindung

sichergestellt. Da diesem Dichtring dabei die Innenoberfläche des Pressfittings als eine der beiden Dichtflächen dient, spielt die Ausprägungsform der Schweißnaht an der Rohrrinnenseite und damit der Schweißnahtwurzel eine entscheidende Rolle. Die Gewährleistung dieser Dichtfläche stellt somit den Funktionsbeitrag der Schweißnaht an das Endprodukt dar.

Auf Basis des definierten Funktionsbeitrags können die **relevanten Qualitätsmerkmale** der Qualitätsmerkmalsgruppe „Schweißnaht“ entsprechend der Produktnorm zugeordnet werden. Aus den Informationen des Normenstrukturbaums erhält man dann die quantitative Ausformulierung dieser Qualitätsmerkmale und die entsprechenden Verweise auf die zugehörigen Definitionen laut Normtext. Für das Beispiel Fittingrohr bedeutet dies, laut Abbildung 4.1.1-4, die Dichtfläche eines Pressfittings wird durch die Qualität der Oberfläche der Schweißnahtwurzel, dem Maß der Wurzelüberhöhung und der Maßhaltigkeit der Rohrwanddicke bestimmt. Die Oberfläche der Schweißnahtwurzel wird durch Angabe des maximal zulässigen Rauigkeitswertes definiert. Dieser liegt mit maximal 1,6 µm noch innerhalb der fertigmöglichen Grenzen entsprechend DIN 17457. Auch das Toleranzband für die Rohrwanddicke liegt mit 0,2 Millimeter noch innerhalb der Bandbreite normativer Vorgaben. Die Begrenzung der Wurzelüberhöhung auf 0,02 Millimeter durch den Kunden, stellt deutlich eine Verschärfung der Anforderungen gegenüber jenen der Produktnorm dar.

Zur effizienten Nutzung der beschriebenen Werkzeuge empfiehlt sich die computergestützte Abbildung, da es somit auch unproblematisch ist, die Daten aus **Kundensegmentierung, Normenstrukturbaum und Qualitätsmerkmalsstruktur** miteinander zu verknüpfen. Die Zuordnung von Qualitätsmerkmalen aus dem Normenstrukturbaum zu Qualitätsmerkmalsgruppen in der Qualitätsmerkmalsstruktur kann vordefiniert erfolgen und die Bedienbarkeit deutlich verbessern. Gleiches gilt für die Zuordnung von quantifizierbaren Merkmalen aus Normenstrukturbaum und Kundenanforderungen. Bei entsprechender Generierung dieser Informationen, nach dem Aufbau des Formblatts zur Erhebung der Qualitätsmerkmalsstruktur über alle Kunden und Marktsegmente, können diese im Sinne einer Datenbank organisiert und genutzt werden. Damit steht ein sehr praktikables Werkzeug zur Verfügung um die Chance, die ein dynamischer Markt für den Bereich der Rohrherstellung bietet, erkennen zu können und in unterschiedlicher Detailtiefe quantifizieren und in Hinblick auf die technologische Umsetzbarkeit beurteilen zu können.

4.1.2 Produktbezogene Gefahrenbetrachtung

Bei extrinsischer Betrachtung der Veränderungen traditioneller Märkte, in Bezug auf Qualitätsanforderungen, Zeit- und Kostendruck, muss der Fokus neben den sich eröffnenden Chancen auch auf die gleichzeitig erwachsenden Gefahren, wie in Abbildung 4.1-1 dargestellt, gelegt werden. Die Notwendigkeit einer strukturierten Betrachtung ergibt sich, analog zur Chancenanalyse, sowohl aus Entscheidungssituationen im Zuge der strategischen Ausrichtung eines Unternehmens, als auch für unmittelbar wirksame, operative Entscheidungen. Aus diesem Grund soll die grundlegende Strukturierung der Methodik, welche zur Abbildung der Chancen entwickelt wurde, auch für den Begriff der Gefahren verwendet werden. Die Begriffe Chancen und Gefahren können nicht getrennt von einander beurteilt werden. Um ein ganzheitliches Bild zu erhalten, ist es sinnvoll, die beiden Begrifflichkeiten einander gegenüberzustellen. Somit wird die Fragestellung, der sich für einen Rohrhersteller durch die Fertigung eines Produkts bietenden Chancen um den Aspekt

erweitert, welche zusätzlichen Gefahren sich für das Unternehmen aus dieser Situation ergeben.

Zur **Ermittlung der Gefahren** kann eine deduktive Methodik ausgehend von den bereits bestimmten Chancen angewendet werden. Gefahrenpotentiale für Erzeuger von Produkten lassen sich schlussendlich immer auf die Nichterfüllung eines Funktionsbeitrags beim Endkunden durch abweichende Qualitätsmerkmale am Produkt zurückführen. Die **Qualitätsmerkmalsstruktur**, die die Stimme des Kunden und der damit verbundenen Chancen widerspiegelt, wird als Ausgangspunkt für die deduktive Ableitung der Gefahren angewendet. Abbildung 4.1.2-1 zeigt schematisch die Vorgehensweise für die Überleitung der Qualitätsmerkmals- in die **Qualitätsabweichungsstruktur** für das Beispiel längsnahtgeschweißter Edelstahlrohre zur Fertigung von Pressfittings im Trinkwasserleitungsbereich.

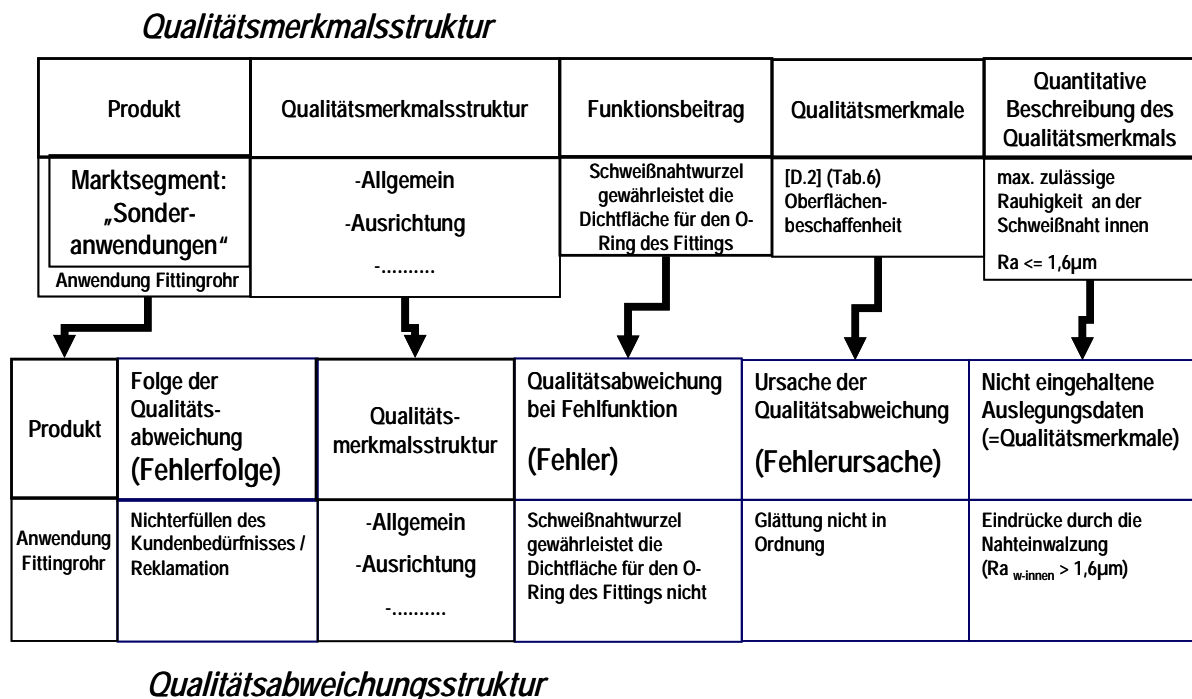


Abbildung 4.1.2-1: Ableitung der Qualitätsabweichungsstruktur am Anwendungsbeispiel Fittingrohr

Ausgehend vom Funktionsbeitrag einer Qualitätsmerkmalsgruppe für das Endprodukt, kann die zu einem **Fehler** führende Qualitätsabweichung bestimmt werden. Betrachtet man die Qualitätsmerkmalsgruppe „Schweißnaht“, so würde eine entsprechende Qualitätsabweichung als Fehlfunktion die mangelnde Gewährleistung der Dichtfläche für den O-Ring des Fittings verursachen. Ausgehend vom Fehlerbegriff können nun zwei Stoßrichtungen beschritten werden. Einerseits kann die Betrachtung der **Fehlerfolge** im Sinne einer Erweiterung des Fokus in Richtung des Kunden erfolgen, und andererseits kann eine Verknüpfung zu möglichen **Fehlerursachen** durch Erhöhung des Detailierungsgrads in Richtung des Produkterstellungsprozesses geschaffen werden. Die Abschätzung des Ausmaßes der Fehlerfolge bietet einen guten Ansatzpunkt, um bereits während der Machbarkeitsprüfung eines Produkts, auch das Thema „**Verhalten des Kunden im Schadensfall**“ abstimmen zu können. Für die Anwendung Pressfitting ist dies eine sehr zentrale Frage, da es sich hierbei um ein Produkt handelt, dass in großer Stückzahl gefertigt und auf dem Gebiet der

Haustechnik und Gebäudeinstallation weit verbreitet eingesetzt wird. Die Leckage eines einzelnen Pressfittings kann vom Schadenswert die Herstellungskosten des gesamten Rohrleitungssystems bei weitem überschreiten. Aus diesem Grund ist es durchaus sinnvoll in Abstimmung mit dem Kunden Schadenssummen aus historischen Daten zur Beschreibung der Folge der Qualitätsabweichung heranzuziehen.

Auf dieser Ebene soll zur Bestimmung der Fehlerursache nur betrachtet werden, welche Abweichung eines quantifizierbaren Merkmals ursächlich für die Nichterfüllung eines Qualitätsmerkmals verantwortlich ist. Eine Erweiterung des Betrachtungsbereichs auf die Ebene des Herstellungsprozesses ist für die Anwendung der Methodik in diesem Stadium nicht zielführend, da auch die sich bietenden Chancen **rein auf Produktebene** abgegrenzt werden. Entsprechend Abbildung 4.1.2-1, ist die Ursache der Qualitätsabweichung für die Undichtigkeit des Pressfittings, ausgehend vom Qualitätsmerkmal „Oberflächenbeschaffenheit der Schweißnahtwurzel [D.2]“ zu sehen. Quantitativ bedeutet dies: Die Rauigkeit an der Schweißnahtwurzel überschreitet einen Wert von 1,6 µm, was in der Spalte „nicht eingehaltene Auslegungsdaten“ abgebildet wird.

Fasst man die Aussage der Qualitätsabweichungsstruktur für das Beispiel Fittingrohr zusammen, so ergibt sich, dass eine Nichteinhaltung der Rauigkeitsvorgabe an der Schweißnahtwurzel von 1,6 µm, die Gefahr einer Feldreklamation durch den Kunden infolge von Schäden durch Leckagen an ausgeführten Gebäudeinstallationen bedeutet. Durch die **Gegenüberstellung von Qualitätsmerkmals- und Qualitätsabweichungsstruktur** kann sehr effizient der grundsätzliche Nutzen eines Produkts für das Unternehmen eingeschätzt werden. Ein solcher Vergleich kann sowohl für einzelne Produkte als auch für Kundengruppen und Marktsegmente durchgeführt werden. In Hinblick auf die praktische Umsetzung ist die Qualitätsabweichungsstruktur als Erweiterung der EDV-Lösung zur Abbildung der Chancen nach Abschnitt 4.1.1 zu betrachten. Dadurch bieten sich die Vorteile einer gesamtheitlichen Lösung mit gemeinsamer Datenbasis, die je nach Anwendungszweck angepasst werden kann.

4.2 Verknüpfung Systemebene Produkt und Prozess

Mittels der beschriebenen Methodik zur strukturierten Abbildung von Chancen und Gefahren, kann jedoch nur eine extrinsische Sichtweise abgebildet werden. Es handelt sich hierbei um eine reine Betrachtung der Marktzusammensetzung, einer Beschreibung der zugehörigen Produkte und der Kundensicht auf die Produkte. Zweifelsohne kann durch eine solche strukturierte Vorgehensweise die Transparenz darüber erhöht werden in welcher Umgebung man sich bewegt. Jedoch bleibt dabei immer ein blinder Fleck in Bezug auf die eigenen Möglichkeiten des Betrachters. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 4.1-1 durch die beiden internen Quadranten **Stärken und Schwächen** abgebildet. Die Qualitätsmerkmalsstruktur steht dabei für Chancen durch Qualität. Dem gegenüber ist die Qualitätsabweichungsstruktur zu sehen, die Gefahren durch Fehler abbildet. Die beiden Begriffe Chancen und Gefahren sind dabei zwar bis auf messbare Kriterien am Produkt heruntergebrochen, doch ob die beschriebenen Qualitätskriterien erfüllt werden können und inwieweit es sinnvoll ist Fehlfunktionskosten in Kauf nehmen zu wollen, kann wieder nur subjektiv eingeschätzt werden. Es fehlt somit nach wie vor ein geeigneter Maßstab zur **Beurteilung des Nutzens** eines Produkts für das Unternehmen.

Betrachtet man erneut das Beispiel der Edelstahlrohre zur Fertigung von **Pressfittings** für Trinkwasserleitungen aus Abschnitt 4.1.1. Aus der Qualitätsmerkmalsstruktur dieses Produkts ergibt sich, dass die Rauigkeit der Schweißnahtwurzel kleiner $1,6 \mu\text{m}$, die Wanddicke in einem Toleranzband von 0,2 Millimeter und die Wurzelüberhöhung kleiner 0,02 Millimeter sein soll. Die Frage ist nun, sind diese **Qualitätsanforderungen** mit der verwendeten Fertigungstechnologie umsetzbar und wenn ja mit welchem Aufwand. Um dies beantworten zu können, muss der Produkterstellungsprozess in die Betrachtung mit einbezogen werden. Die eigentliche Stärke eines Unternehmens liegt darin, mit welchen Mitteln es die Leistungserstellung durchführt, wobei dies für die weitere Betrachtung auf den Produkterstellungsprozess eingegrenzt werden soll. Somit muss zur Abbildung der Stärken eines Erzeugers von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren zwangsläufig eine Aufnahme und technische Analyse der Fertigungstechnologie durchgeführt werden. Um den zweiten Teil der Fragestellung nach dem notwendigen Aufwand beantworten zu können, bedarf es einer **Wirtschaftlichkeitsbetrachtung** des Produkterstellungsprozesses. Dadurch ist auch ein klares Aufzeigen von vorhandenen Schwächen des Unternehmens möglich.

Im folgenden Abschnitt soll nun durch Ausformulierung der intrinsischen Sichtweise der Quadranten „Stärken und Schwächen“ eine Möglichkeit geschaffen werden, die externen Begriffe „Chancen und Gefahren“ in Bezug auf die eigenen Möglichkeiten quantitativ beurteilen zu können.

Die zentrale Kompetenz eines Produktionsbetriebs liegt in der Fähigkeit anforderungsgerechte Produkte zu generieren. Aus diesem Grund ist hier der verwendete Produkterstellungsprozess als zentrales Element anzusehen, aus dem ein Unternehmen seine Stärke ableitet. Für eine detaillierte Beschreibung des **Quadranten „Stärken“**, nach Abbildung 4.1-1, genügt es nicht sich rein auf der Ebene ablauforganisatorischer Prozesse zu bewegen. Vielmehr ist eine tiefgehende technologische **Analyse des Produktionsprozesses** nötig. Wie bereits in Kapitel 3.2 für die Herstellung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren beschrieben und beispielhaft in Abbildung 3.2.3-2 visualisiert, handelt es sich bei vielen Produkterstellungsprozessen um eine Verkettung von Arbeitsschritten, die dadurch in Interaktion zu einander treten. Die unsegmentierte Betrachtung eines Fertigungsprozesses kann nur wenig inhaltliche Antworten auf die beschriebenen Fragestellungen bieten. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, den Produkterstellungsprozess in relevante Teilprozesse zu untergliedern.

Eine solche **Strukturierung eines Produktionsprozesses** ist in Abbildung 4.2-1 für das Beispiel einer Rohrstraße zur Herstellung von Edelstahlrohren dargestellt. Die Abgrenzung der einzelnen Teilprozesse erfolgt funktionsorientiert, sodass einzelne Arbeitsschritte, auch wenn sie kontinuierlich miteinander verbunden sind, abgebildet werden können. Die Funktion der Prozessschritte „1 Einformteil“, „2 Schweißerei“ und „7 Glüher“, und damit ihre Bedeutung für die Herstellung eines längsnahtgeschweißten Edelstahlrohres, wurden bereits unter den Abschnitten 3.2.1, 3.2.2 und 3.2.3 dargestellt. Alle Arbeitsschritte können auch klar abgrenzbar physischen Komponenten und Maschinenteilen zugeordnet werden.

Die wesentliche Verknüpfung der spezifizierten Teilprozesse erfolgt über das Produkt selbst, welches in seinen unterschiedlichen Fertigungsstadien diese in linearer Art und Weise durchläuft. Die starke Ausprägtheit dieser Verknüpfung ergibt sich auch dadurch, dass keine Manipulationsschritte zwischen einzelnen Fertigungsschritten in einer Rohrstraße nötig sind, sondern es sich um einen kontinuierlichen Endlosprozess handelt.

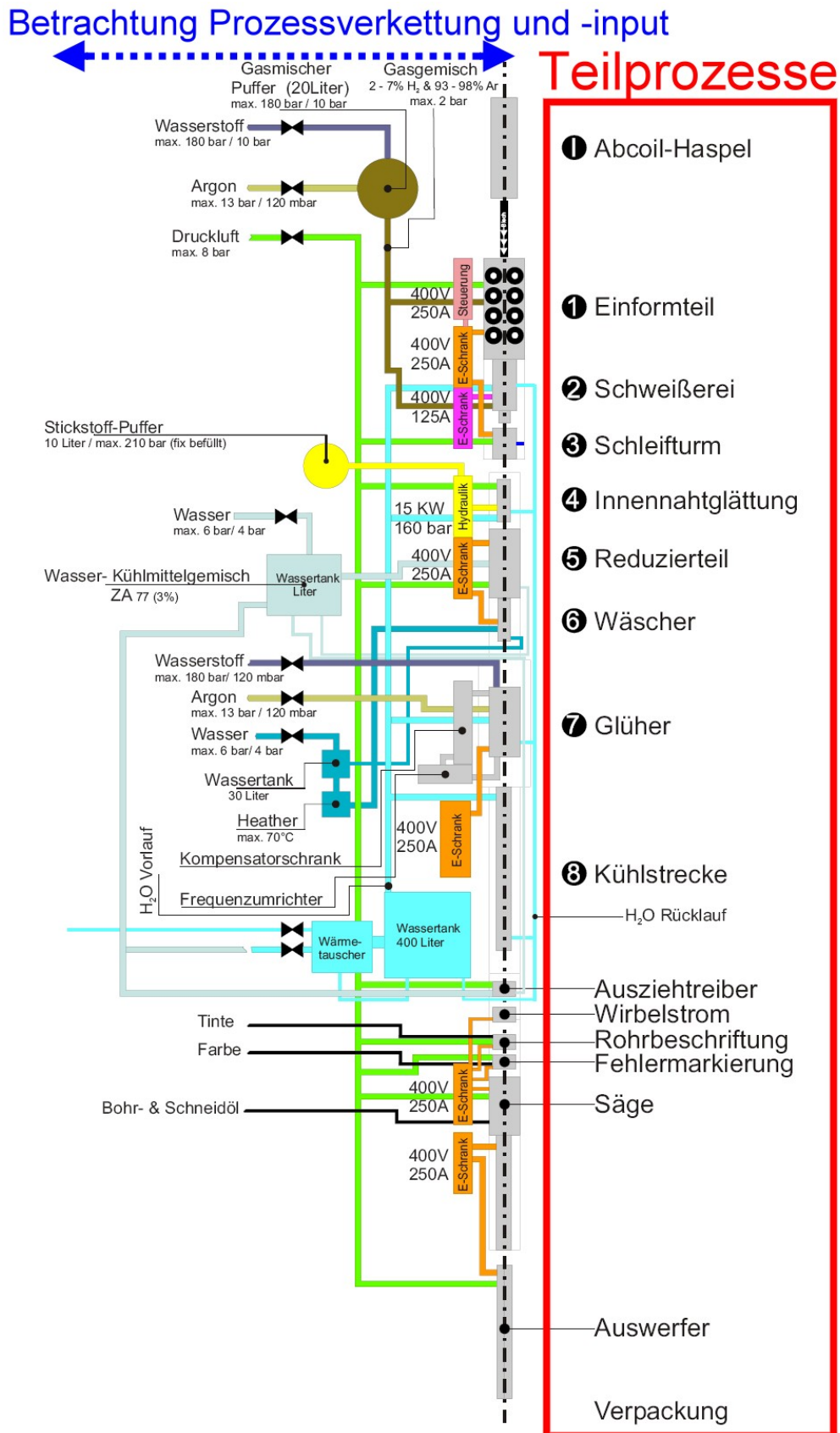


Abbildung 4.2-1: Technologische Strukturierung des Produkterstellungsprozesses zur Herstellung längsnahtgeschweißter Edelstahlrohr

Zur Erhöhung des technischen Verständnisses dient eine Erweiterung der Visualisierung in Bezug auf die maschinentechnische Prozessverkettung und den zusätzlichen Prozessinput, neben dem Ausgangsmaterial, durch Energie, Medienversorgung, Hilfs- und Verbrauchsstoffe. Dabei sollen die jeweiligen Eingangsgrößen auch durch ihre relevanten Parameter charakterisiert sein. Die Festlegung der zu wählenden Beschreibungsgrößen orientiert sich an der Zielsetzung, alle **Stoffflüsse monetär beschreiben** zu können. Für die praktische Umsetzung bedeutet dies, dass nicht nur diskrete Daten, wie in Abbildung 4.2-1 dargestellt, einzelnen Prozessschritten zugeordnet werden können, sondern auch entsprechende Algorithmen und Modelle zur **Quantifizierung des Prozessinputs** hinterlegt werden müssen. Dabei kann es sich um empirisch ermittelte Zusammenhänge aus historischen Daten handeln, die die maximal nötige elektrische Arbeit eines Antriebsmotors und damit direkt die entsprechenden Energiekosten, über die angegebenen Grenzwerte von elektrischer Leistung und Drehzahl bestimmt werden. Würden die Energiekosten für die Antriebsarbeit einzelner Prozessschritte auf dieser Basis bestimmt, erhielte man ein sehr stark von der Realität abweichendes Bild, da man sich immer in Teillastbereichen bewegen wird. Aus diesem Grund ist es für diesen, und auch für andere Fertigungsschritte sinnvoller, sich auf Näherungsformeln, welche aus Erfahrungswerten abgeleitet wurden, zu beziehen. Für die Bestimmung der nötigen Antriebsleistung kann die mittlere benötigte elektrische Antriebsarbeit über einen **Regressionsalgorithmus** in Bezug auf die Rohrwanddicke und den Rohrdurchmesser bestimmt werden. Eine entsprechend abgestimmte, automatisierte Betriebsdatenerfassung kann bei einer solchen Betrachtung gute Dienste leisten. Aus diesem Grund ist es heute üblich, Großmaschinen wie Rohrstraßen über eine zentrale Steuerung zu vernetzen und so auch eine Datenzusammenführung durchzuführen, die eine detaillierte Auswertung ermöglicht.

Durch eine solche strukturierte Betrachtung ist es nun möglich einen Überblick über die Zusammensetzung der Kosten für die Produkterstellung zu gewinnen. Die Basis dieser Kostenbetrachtung bildet das gefertigte Produkt. Ausgehend von individuellen Spezifikationen, wie in Tabelle 4.2-1 dargestellt, können bezogen auf diesen Anwendungsfall die Kosten ausgehend von technologischen Parametern bestimmt werden. Natürlich sind für die Anwendung dieser Methodik auch entsprechende Grenzen gesetzt. Gerade Kostenblöcke wie Personalkosten oder Investitionskosten können nur an Hand entsprechender Kostenrechnungsverfahren berücksichtigt werden. Für die praktische Anwendung ist es im Regelfall möglich hier eine entsprechende Abstimmung mit den Daten aus dem konventionellen Kostenrechnungssystem zu finden.

Auf Basis der hinterlegten Größen und Berechnungsmodelle können je Prozessschritt somit die Kostenanteile in Bezug auf das Endprodukt bestimmt werden. Für das Anwendungsbeispiel Edelstahlrohr ist eine Gliederung in **rohrdimensions- und mengenabhängige Kostenbestandteile**, nach Tabelle 4.2-2, sinnvoll. Diese Strukturierung ist auf Basis der technologischen Zusammenhänge abgeleitet und verfolgt nicht den Sinn, den Begriff konventioneller Kostenarten und Kostenartengruppen zu ersetzen. Als kleinster gemeinsamer Nenner zur Normierung der Kosten ist, in Anlehnung zu Abschnitt 4.1.1, ein produzierter Laufmeter (lfm) Edelstahlrohr verwendet.

Kalkulationsblatt Kosten/lfm Edelstahlrohr lt. Produktionsauftrag			
Angaben lt. Produktionsauftrag		variable Kosten / Verbrauchseinheit	
Rohrdurchmesser [mm]	15	Kosten / KWh	€0,07
Rohrwandstärke [mm]	1	Kosten Argon / Nm ³	€0,59
Werkstoff	1.4541	Kosten Wasserstoff / Nm ³	€0,42
Produktionsgeschwindigkeit [m/min]	6	Kosten Edelstahlband (ohne LZ) /kg	€1,52
Verwendete Elektrodenanzahl	2	Legierungszuschlag Band (Stand 08-2005)	€1,24
Glühtemperatur [°C]	1100	Personalkostenstundensatz MF [€/h]	€13,10
Anlage	P22		
Rohrlänge [m]	6		

Tabelle 4.2-1: Produkt- und Prozessspezifikation für die Fertigung eines geschweißten Edelstahlrohres

Aus Tabelle 4.2-2 wird deutlich, dass die Prozessschritte Schweißen und Glühen in direktem Zusammenhang mit der Rohrdimension stehen, was sich auf alle zugehörigen Prozessinputgrößen auswirkt. Man erkennt auch, dass der eingesetzte Warenwert des verwendeten **Vormaterials** den wesentlichen Kostenbestandteil für das Endprodukt darstellt. Dabei sind alle dem Werkstoff zurechenbare Kosten, wie Legierungszuschläge und Transportkosten bereits inkludiert. In Summe stellen die rohrdimensionsabhängigen Kosten den weitaus größeren Kostenblock gegenüber den mengenabhängigen Kosten dar. Kosten für Umformwerkzeuge, entsprechend dem beschriebenen Einsatzzweck in Abbildung 3.2.1-1 für das Walzprofilieren, sind als tendenziell bedeutsamer Kostenanteil zu betrachten. Wobei genau zur Betrachtung dieser Zusammenhänge eine solche Art der Kostengliederung ausgehend von technologischen Gesichtspunkten durchaus zielführend erscheint. Die **Werkzeugkosten** können nun beispielsweise in Bezug auf unterschiedliche Rohrdimensionen und den damit verbundenen Werkzeugausprägungen und –ausführungen betrachtet werden.

Als Ergebnis dieser Analyse ergibt sich ein Wert für die Produktkosten eines Laufmeters Edelstahlrohr. Diese Größe kann in Hinblick auf ihre Sensibilität auf Dimensionsänderungen oder Produktionsgeschwindigkeitssteigerungen durch entsprechende Fallstudien analysiert werden. Besonders in Hinblick auf bereits verwendete Kalkulationstools lohnt in diesem Zusammenhang ein entsprechender Vergleich und gegebenenfalls Abgleich der Ergebnisse. Ziel sollte es sein, auf Basis einer technologischen Analyse des Produktionsprozesses eine entsprechende Kostenzuordnung zu einzelnen Arbeitsschritten zu finden, die die reale Kostenstruktur in einem Unternehmen widerspiegelt.

Mittels dieses geschlossenen Bildes kann die verwendete Produktionstechnologie erst in Bezug auf seine Stärken wahrgenommen werden. Die Strukturierung des Fertigungsprozesses und die monetäre Quantifizierung der zuordenbaren Kostenströme stellt somit die **interne Sichtweise** auf den **Stärke-Quadranten** in Abbildung 4.1-1 dar.

Berechnete Kostenanteile / lfm Edelstahlrohr		Kostenanteile [%] bezogen auf die Herstellungskosten je lfm Edelstahlrohr
Kosten Rohrdimensionsabhängig		
Stromkosten Schweißen	,0124937€/lfm	1,00%
Kosten Argon Schweißen	,0047448€/lfm	0,38%
Kosten Wasserstoff Schweißen	,000204€/lfm	0,02%
Stromkosten Glühen	,0239236€/lfm	1,91%
Kosten Wasserstoff Glühen	,00896€/lfm	0,72%
Materialkosten Edelstahl	,9993468€/lfm	79,88%
Kosten Kühlung Schweißen	,0001584€/lfm	0,01%
Kosten Kühlung Glühen	,0010404€/lfm	0,08%
Kosten Mengenabhängig		
Summe Kosten Verschleißteile	,0065444€/lfm	0,52%
Summe Kosten Profilierwerkzeuge	,1192607 €/lfm	9,53%
Stromkosten Antriebsmotore	,00525€/lfm	0,42%
Stromkosten Schleifmotor	,0021389€/lfm	0,17%
Stromkosten Pumpen	,0025336€/lfm	0,20%
Stromkosten NEW	,0236651€/lfm	1,89%
Stromkosten Heizung Betriebsmedien	,0018667€/lfm	0,15%
Stromkosten Säge	,002469€/lfm	0,20%
Personalkosten Maschinenführer	,0363993€/lfm	2,91%
Herstellungskosten je lfm Edelstahlrohr		1,2509995€/lfm

Tabelle 4.2-2: Technologische Produktionskostengliederung für die Herstellung eines geschweißten Edelstahlrohres

Die zuvor beschriebene Methodik geht jedoch von einem fehlerfrei funktionierenden System aus. Themen wie Ausschuss oder Produktionsausfälle durch Stillstandszeiten werden dabei nicht berücksichtigt. Genau diese Begriffe beschreiben aber die **Schwächen einer Fertigungstechnologie** und müssen zur Vervollständigung der Sichtweise unbedingt mit in die Betrachtung aufgenommen werden. Aus diesem Grund kommt zur Beschreibung des Schwäche-Quadranten in Abbildung 4.1-1 eine **Effektivitätsanalyse** in Anlehnung zu Abschnitt 3.3 zum Einsatz.

Es handelt sich bei der Produktion von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren um einen stark linearen Produkterstellungsprozess, in dem alle relevanten Umform-, Füge- und Wärmebehandlungsoperationen in einer Rohrprofilieranlage ohne zusätzliche Manipulationsschritte miteinander verknüpft sind. Durch diese klare Struktur können Prozessabweichungen wie Produktfehler, Stillstandszeiten oder verringerte Ausstoßmenge durch automatisierte Systeme erhoben werden. Dabei ist es zweckmäßig, alle im Sinne einer Betriebsdatenerfassung erhobenen Daten zusammenzufassen, wodurch sich ein **multidimensionaler Datenwürfel** ergibt. Durch die sich ergebende Datenfülle müssen Systeme gefunden werden, um die Transparenz und Auswertbarkeit zu gewährleisten. Eine geeignete Methodik dazu findet man in der Bestimmung von Kennzahlen zur Beschreibung der Produktivität einer Produktionseinrichtung nach Abschnitt 3.3.

Zur Betrachtung der Produktivität einer Rohrstraße soll dafür die **Arbeitszeitkaskade** nach Abbildung 3.3-1 herangezogen werden. Wie bereits ausgeführt, können über diese Darstellung und Bildung der zugehörigen Teilkennzahlen, Aussagen über den Nutzen der Anlage, als auch über die Effektivität des Betriebs gemacht werden.

Die Ermittlung der Datenbasis zur **Bestimmung der Gesamtanlageneffektivität** entsprechend des TPM-Konzeptes stellt gerade für die Einführungsphase eine Herausforderung dar. In vielen Fällen wird auf Beobachtung von Einrichtzeit, Justage, Maschinenversagen und kurze Unterbrechungen durch ausgewählte Personen verwiesen. Die Verwendung mechanischer oder mit Computerunterstützung gewonnener Ergebnisse wird als nicht ratsam eingeschätzt, da es schwierig wäre, die exakten Verlustdaten hierbei herauszuarbeiten [69].

Wird die Betriebsdatenerfassung jedoch entsprechend strukturiert durchgeführt, so ergibt sich daraus ein Anhaltspunkt, um mit der Problematik der Bestimmbarkeit der Gesamtanlageneffektivität umgehen zu können. Dabei können Prozessabweichungen fertigungssynchron detektiert und den Verlustquellen, nach Abbildung 3.3-1, „geplante Stillstände“, „Ausfälle“, „Verluste“ und „Fehler“ zugeordnet werden. Bereits im Zuge der Erfassung sollen die Daten entsprechend der Balken in der Kaskade aggregiert werden, wobei dies automatisiert, auf Basis einer einmaligen Definition, durchgeführt werden kann. Somit stehen ständig alle Informationen bereit, um eine strukturierte Produktivitätsbetrachtung eines Fertigungsprozesses unter Nutzung der Arbeitszeitkaskade ableiten zu können.

Eine solche Produktivitätsbetrachtung einer Anlage vereinigt die Faktoren Zeit, Geschwindigkeit und Qualität und zeigt an, wie diese Faktoren die Wertschöpfung steigern können [74].

Die Steigerung der Gesamtanlageneffektivität zielt durch die Verbesserung des Anlagenzustands, aber indirekt auf die Sicherstellung und Steigerung der Produktqualität ab. Diesem Ansinnen wird auch direkt durch die Bestimmung des Begriffs der Qualitätsverluste Rechnung getragen. Der **Verlust aus Ausschuss und Nacharbeit fehlerhafter Produkte**, welcher sich durch mangelhaft funktionierende Anlagen oder unzureichendes Zusammenwirken zwischen Maschinenbediener, Anlage und Umfeld ergibt, wird als sehr bedeutsam eingestuft [68].

Durch Einengung des Fokus auf Kennzahlen, wie sie OEE oder TEEP darstellen, kann dem Gedanken der Qualitätsorientierung oft nicht entsprechend Rechnung getragen werden. Mengenmäßig stellen Qualitätsabweichungen im Regelfall einen wesentlich kleineren Einfluss auf die Minderung der Produktivzeit einer Anlage dar als Themen wie Stillstände aus technischen Gebrechen oder Verringerung der Ausstoßmenge. Durch die Kennzahlbildung kommt es somit zu einer **Nivellierung**, sodass die zentrale Bedeutung der Auseinandersetzung mit Qualitätsverlusten unterschätzt werden könnte. Aus diesem Grund soll im Folgenden der Schwerpunkt der Betrachtung auf der Kategorie „Fehler“, laut Abbildung 3.3-1, liegen.

Die Schwäche des verwendeten Produkterstellungsprozesses wird über die auftretenden Qualitätsverluste definiert. Ausgehend von der Stärke eines Unternehmens, abgebildet durch die strukturierte Analyse des Fertigungsprozesses, kann durch Betrachtung des Verlusts an Produktivzeit durch Fehler am Produkt, ein Maß für die Schwäche abgeleitet werden. Entsprechend Abbildung 4.2-2 können somit beide internen Quadranten beschrieben werden. Dabei bewegt man sich grundsätzlich auf **Systemebene Prozess**. Jedoch kann auch hier eine Betrachtung des Produkterstellungsprozesses, analog zu TPM, nicht als Selbstzweck gesehen werden. Durch die Konzentration auf den Verlustbalken „Fehler“ kann der Konnex zur **Systemebene Produkt** hergestellt werden.

Verknüpfung
Kaskade Gesamtanlageneffektivität

Produktstellungsprozess
(Systemebene Prozess)

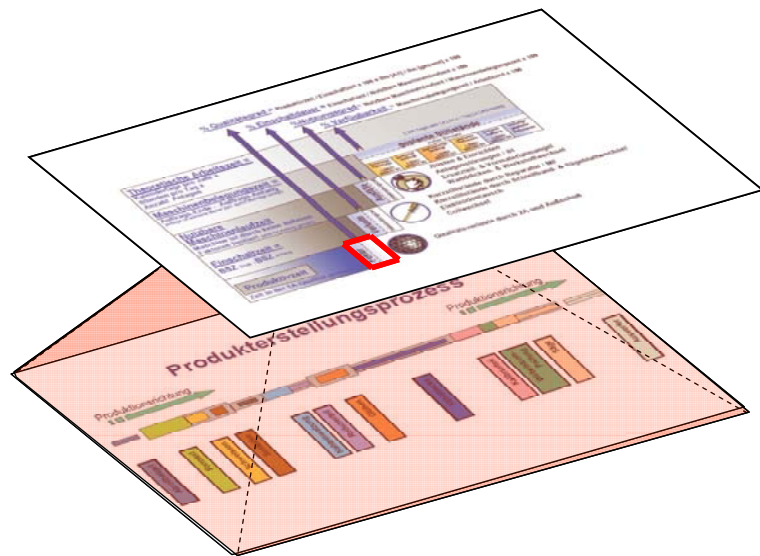


Abbildung 4.2-2: Abbildung der Effektivität des Produktionsprozess über eine Kaskadierung der unproduktiven Zeitanteile

Entsprechend Abbildung 4.1.2-1 können Fehler am Produkt systematisch durch die Qualitätsabweichungsstruktur abgebildet werden. Qualitätsmerkmals- und Qualitätsabweichungsstruktur stellen dabei die externen Quadranten „Chancen“ und „Gefahren“ dar. Durch **Ableich der Kategorien** zur Erfassung der Qualitätsverluste nach der Arbeitszeitkaskade und der Qualitätsabweichungen bei Fehlfunktion laut Qualitätsabweichungsstruktur, kann die Verknüpfung der Systemebenen Prozess und Produkt erfolgen. Man nähert sich dabei von beiden relevanten Stoßrichtungen. Einerseits den Chancen, die ein Produkt für das Unternehmen bieten kann, entsprechend der **Qualitätsmerkmalsstruktur**. Andererseits den Stärken, die durch den Einsatz der verwendeten Fertigungstechnologie, betrachtet als störungsfreien **Idealprozess**, zur Verfügung stehen. Dabei liegt der Output der Betrachtung der Chancen in einer Quantifizierung der Qualitätsanforderungen des Kunden an das Produkt und der Stärken in einer technologisch orientierten Bestimmung der Herstellungskosten. Der Lückenschluss zwischen diesen beiden Feldern wird über die Ableitung der jeweiligen Abweichung vollzogen. Wie bereits unter Abschnitt 3.3 ausgeführt, ist jede Qualitätsabweichung am Produkt durch einen entsprechenden **Prozessfehler** zu begründen. Somit muss auch jedes, entsprechend der Verlustquelle „Fehler“, ermittelte Ereignis einer Qualitätsabweichung am Produkt zuordenbar sein. Diese strukturierte Überleitung wird in Abbildung 4.2-3 und 4.2-4 dargestellt.

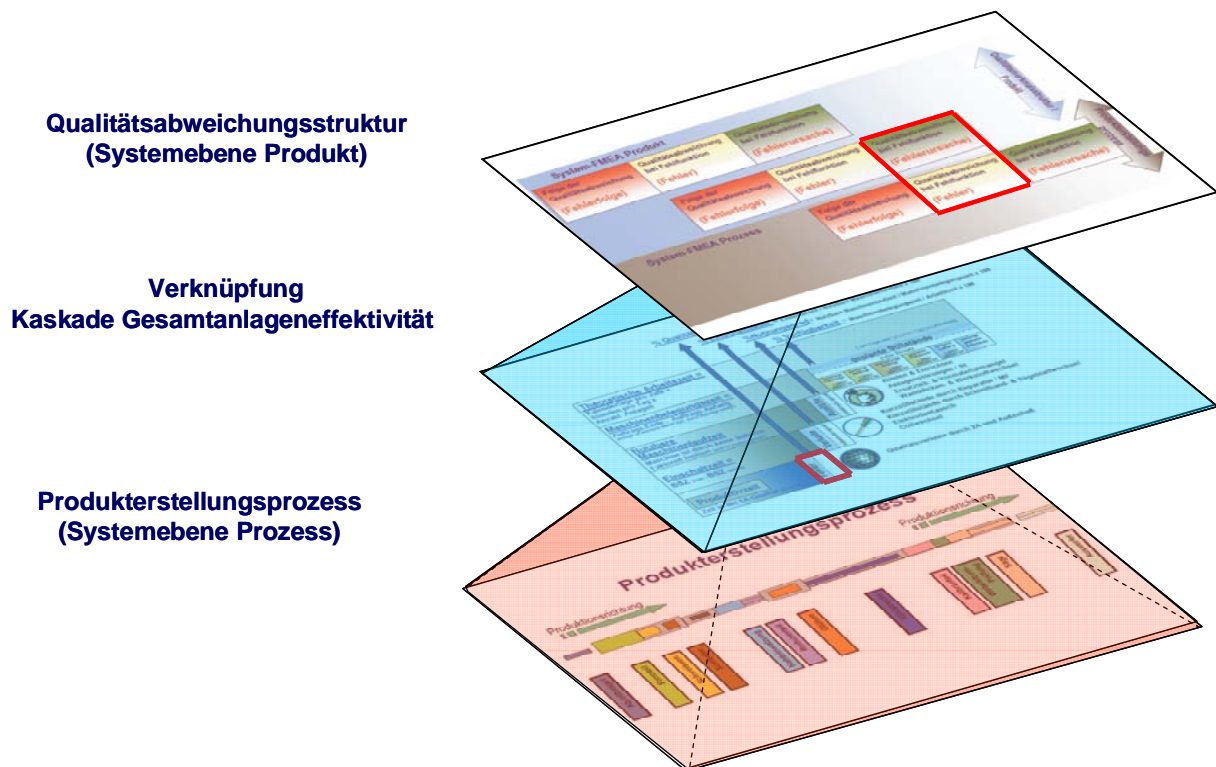


Abbildung 4.2-3: Verknüpfung der Qualitätsabweichungen am Produkt mit dem Produkterstellungsprozess über die Effektivitätsbetrachtung

Zur nötigen **Definition von Fehlertypen**, die der Kategorie „Fehler“ entsprechend der Arbeitszeitkaskade zugeordnet werden müssen, um eine strukturierte Erhebung von Betriebsdaten zu ermöglichen, sollen die Ursachen der Qualitätsabweichung (Fehlerursachen) aus den Qualitätsmerkmalsstrukturen der gefertigten Produkte verwendet werden. Somit wird eine völlige Durchgängigkeit, ohne Notwendigkeit einer Umschlüsselung, erreicht.

Analog zur Einteilung und **Überleitung der Betrachtungsgegenstände** für die Durchführung einer FMEA nach VDA 6.0, können auch hier Qualitätsabweichungsstruktur auf Produktebene und Kategorien der Qualitätsverluste auf Prozessebene ineinander übergeführt werden. Unabhängig davon, ob man sich auf Systemebene „Prozess“ oder Systemebene „Produkt“ befindet, stellt jeweils der Fehler auf tieferer Ebene die Fehlerursache für die nächst höhere Ebene dar. Betrachtet man nun die Schnittstelle zwischen Prozess und Produkt, so ist ein auftretender Prozessfehler als Fehlerursache für die Abweichung des Produkts zu sehen. Die Fehlerfolge, aus Sicht des Verursachers, ist somit ident mit dem auftretenden Fehler auf Ebene des Betroffenen.

Bei dieser Überleitung bleibt der **quantitative Gedanke**, in dessen Sinne alle Kriterien ausformuliert wurden, erhalten, denn nur so ist es möglich, bei der Integration top-down, auf Prozessebene wirkliche Ursachen für die Prozessfehler auszumachen.

Entsprechend Abbildung 4.2-5 erfolgt die Verknüpfung von Ursachen für die Qualitätsabweichung am Produkt bzw. Prozessfehlern am Beispiel des Prozessschritts Schweißen. Bei den Punkten 1 bis 9 handelt es sich um charakteristische Qualitätsabweichungen für das Schweißen von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren, die fertigungssynchron durch automatisierte Prüfeinrichtungen und die laufende Qualitätskontrolle durch den Werker detektiert werden können. Dementsprechend kann die

Datenaufnahme automatisiert oder manuell erfolgen. Ergebnisse einer visuellen Prüfung werden in der Regel manuell über ein Terminal durch den Mitarbeiter erfasst. Durch automatisierte Prüfeinrichtungen, wie Wirbelstromprüfeinrichtungen, ist es möglich an Hand von Referenzdaten wiederkehrende Fehler den definierten Kategorien von 1 bis 9 zuzuordnen. Durch die Erhebung dieser Daten kann bestimmt werden, wie häufig tritt ein solcher Prozessfehler auf und welcher Verlust an Produktivzeit wird dadurch verursacht. Somit ist das Auftreten eines Fehlers, in Analogie zu Abschnitt 3.4, immer unter zwei Gesichtspunkten zu betrachten. Einerseits mit welcher Häufigkeit tritt ein und derselbe Fehler auf und andererseits welche Bedeutung hat dieser Fehler für die Effizienz des Herstellungsprozesses. Die Verknüpfung dieser beiden Sichtweisen durch den Begriff des Risikos, soll nun auf Basis einer **quantifizierbaren FMEA** für die Fertigung von Edelstahlrohren auf Systemebene Produkt erfolgen.

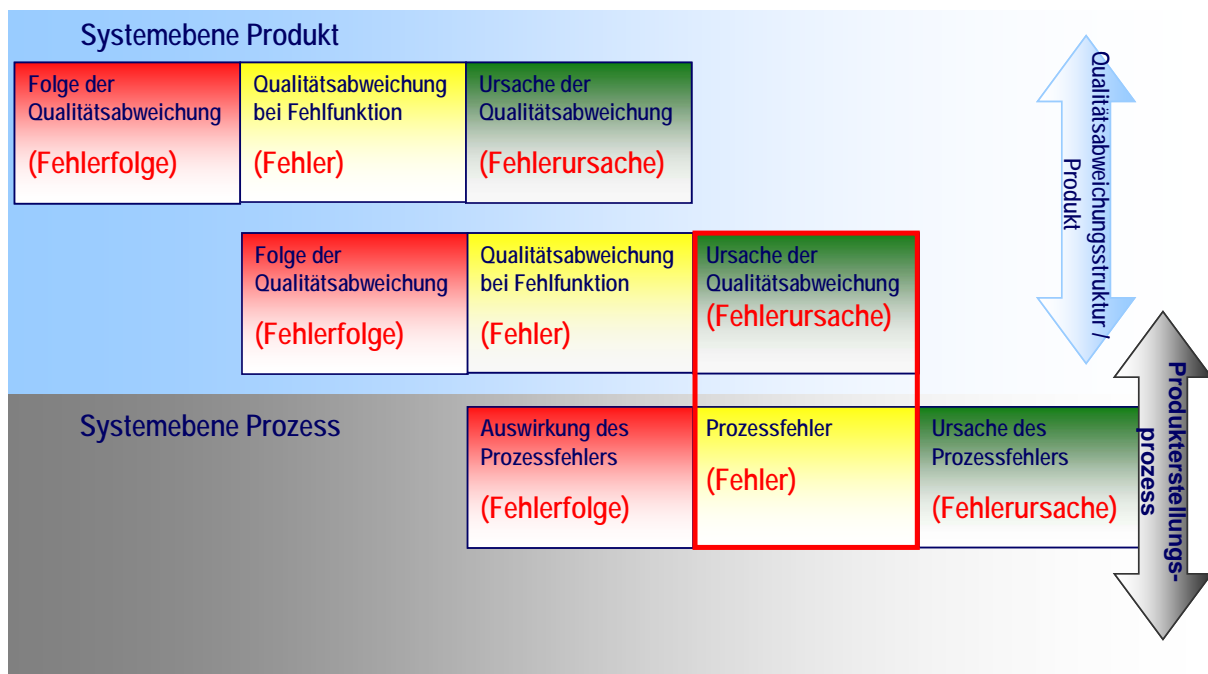


Abbildung 4.2-4: Überleitung Systemebene Produkt – Systemebene Prozess

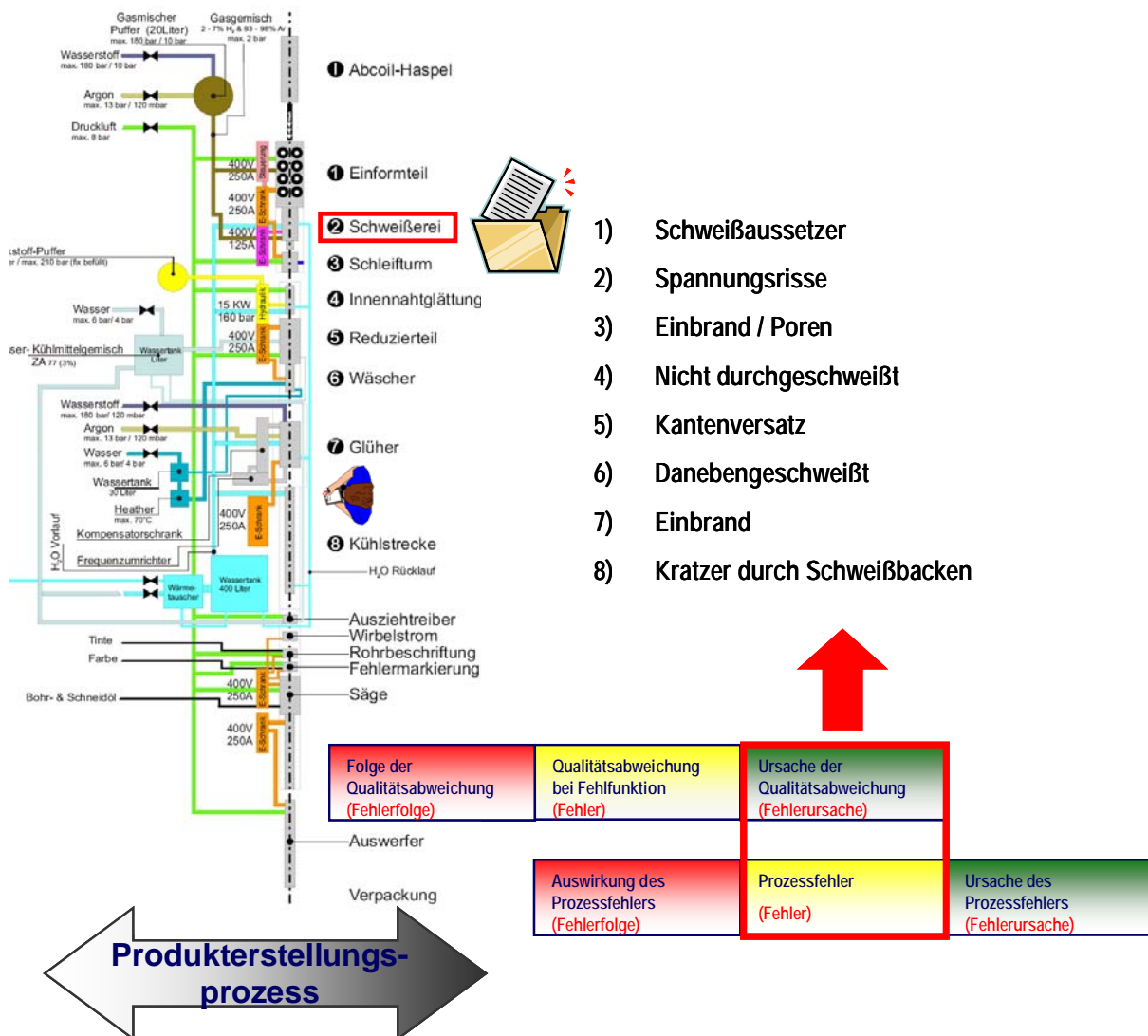


Abbildung 4.2-5: Strukturierte Betrachtung der Prozessfehler auf Systemebene Prozess gegliedert nach Arbeitsschritten

4.3 Quantitative Risikobetrachtung Prozess

Die entsprechend Abschnitt 4.2 gewonnenen Daten aus einer Effektivitätsbetrachtung des Produktstellungsprozesses eignen sich zur Bestimmung des Eintrittsrisikos verschiedener Prozessfehler und damit auch für das Auftreten von zuordenbaren Qualitätsabweichungen. Dazu wird die Häufigkeit von Fehlern als auch der zugehörige Produktionsausfall ermittelt. Nach Gleichung 3.4-1 kann das Risiko eines Ereignisses aus seiner Häufigkeit und Bedeutung bestimmt werden. Die **Auftrittshäufigkeit** von Prozessfehlern kann direkt dieser Definition zugeordnet werden. Zur Bestimmung der Bedeutung wird der, dem Produktionsausfall, zuordenbare Verlust verwendet. Zur mathematischen Bestimmung des Risikos, wie in Abbildung 3.4-1 dargestellt, müssen entsprechende Bezugsgrößen, wie Zeit oder Produktionsmenge und **Quantifizierungskriterien** für die Bedeutung wie Ausschussmengen oder Lieferzeitverzögerung festgelegt werden. Für den betrachteten Prozess der Fertigung von

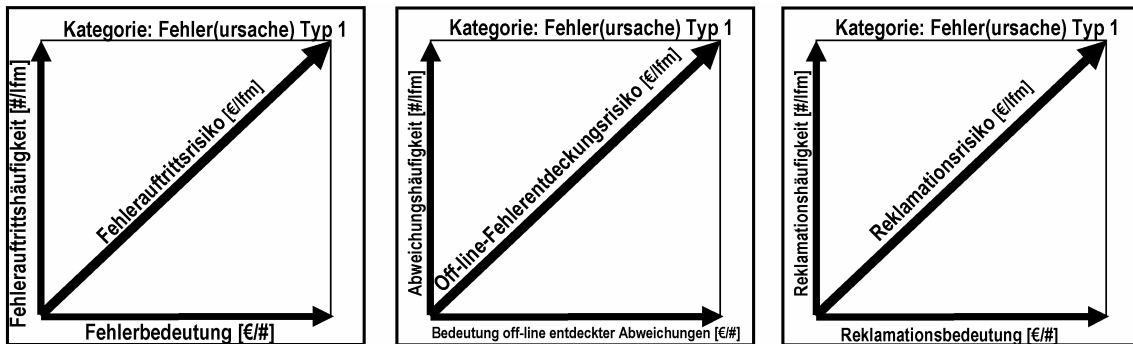
längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren wird als **Bezugsbasis** die 1A-Produktionsmenge (Produktionsmenge ohne Ausschuss und Schrott) angegeben in Laufmeter (lfm) gewählt. Die Ordinate zur Bestimmung des Risikos, als Maß für die Häufigkeit, wird somit als Größe in der Einheit „Anzahl des Auftretens eines Ereignisses / Gesamtproduktionsmenge“ (#/lfm) angegeben.

Wie unter Abschnitt 4.2 beschrieben, kann durch eine Gliederung des Produktionsprozesses und eine strukturierte technologisch orientierte Vernetzung der Stoff- und Energieflüsse die nachhaltige Bestimmung der **Stückkosten** erfolgen. Für die Fertigung von Endlosprodukten im Sinne einer Edelstahlrohrfertigung erfolgt auch hier die Verwendung des Bezugsmaßes „Laufmeter“, wie in Tabelle 4.2-2 dargestellt. Mittels dieser Kosten für die Produktion einer Bezugseinheit, können nun auch Prozessverluste durch Schrott, Ausschuss, Produktivitätsminderung und Stillstandszeiten der Produktionsanlage quantifiziert werden. Somit können Prozessfehler aus dem Verlusteblock „Fehler“, laut Abbildung 3.3-1, monetär bewertet werden. Dieser **bewertete Verlust** stellt das Maß für die Abszisse der Risikoermittlung dar und trägt die Einheit „Euro / Ereignis“ (€/ #). Bestimmt man nun das Risiko durch Multiplikation dieser beiden Größen, so gelangt man zu einer quantitativen Größe in der Einheit „Euro / Gesamtproduktionsmenge“ (€/ lfm). Dadurch kann das Risiko in einer Einheit beschrieben werden, die mit den Produkterstellungskosten auf Stückbasis vergleichbar ist.

Das bedeutet, dass eine **Risikobestimmung** für jede Qualitätsabweichung und Qualitätsabweichungsgruppe entsprechend der Qualitätsabweichungsstruktur erfolgen kann. Betrachtet man den Punkt „Schweißnaht“ der Qualitätsmerkmalsstruktur eines längsnahtgeschweißten Edelstahlrohres nach Abbildung 4.1.1-4, so stellt eines der quantifizierten Merkmale die Oberflächenbeschaffenheit dar. Durch Ableitung der Qualitätsabweichungsstruktur ergibt sich als eine Fehlerursache „Glättung nicht in Ordnung“ in Abbildung 4.1.2-1. Somit beschreibt die Begrifflichkeit „Glättung nicht in Ordnung“, im Sinne der Überleitung Systemebene „Produkt“ auf Systemebene „Prozess“, den Prozessfehler. Die Auswertung der gesammelten Betriebsdaten kann nun danach erfolgen, wie häufig der Prozessfehler „Glättung nicht in Ordnung“ aufgetreten ist und welche Mengen an Ausschuss dadurch erzeugt wurden. Aus der damit bestimmbaren Fehlerauftrittshäufigkeit und der Fehlerbedeutung kann das Risiko für den Prozessfehler „Glättung nicht in Ordnung“ und damit auch für das Auftreten der Qualitätsabweichung angegeben werden. Man erhält somit den Begriff des **Fehlerauftrittsrisikos**, welches entsprechend Abbildung 4.3-1 zu bestimmen ist. Das Fehlerauftrittsrisiko kann lückenlos für alle definierten Qualitätsabweichungen und Qualitätsabweichungsgruppen erfolgen.

Die ausschließliche Konzentration auf Prozessfehler und unter welchem Risiko diese auftreten, wäre jedoch ein unvollständiger Zugang im Sinne einer **grundlegenden Kundenorientierung**. Wie unter Abschnitt 3.4 bereits ausgeführt, setzt die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse hier auf einen ganzheitlicheren Zugang, um die Sichtweise des Kunden in die Risikobetrachtung mit einbeziehen zu können. Dieser Vorteil soll, in Analogie zur dreiteiligen Risikoprioritätszahl, genutzt werden, aber die Subjektivität der FMEA durch Verwendung eines quantifizierbaren Risikobegriffs behoben werden.

Laut FMEA ist die erste Teilkennzahl der Risikoprioritätszahl für das Risiko zu bilden, dass ein Fehler am Produkt überhaupt auftritt. Diese Thematik wird durch das Fehlerauftrittsrisiko beschrieben. Bekannte Qualitätsabweichungen und Produktfehler, die innerhalb der Detektionsgrenzen von automatisierten Prüfeinrichtungen (z.B. Wirbelstromprüfung oder automatisierte Durchmesser messung) liegen, werden durch das Fehlerauftrittsrisiko erfasst.



- (1) Fehlerauftrittsrisiko [€/lfm] = Fehlerauftrittshäufigkeit[# / lfm] × Fehlerbedeutung[€/#]
- (2) off - line - Fehlerentdeckungsrisiko [€/lfm] = Abweichungshäufigkeit [# / lfm] × Bedeutung off - line entdeckter Abweichungen [€/#]
- (3) Reklamationsrisiko [€/lfm] = Reklamationshäufigkeit[# / lfm] × Reklamationsbedeutung[€/#]
- (4) RQZ[€/lfm] = $\sqrt[3]{\text{Fehlerauftrittsrisiko} \times \text{off - line - Fehlerentdeckungsrisiko} \times \text{Reklamationsrisiko}}$

Abbildung 4.3-1: Ermittlung der Risikoquantifizierungszahl [75]

Handelt es sich aber um eine nicht im Zuge des Produkterstellungsprozesses erkennbare Abweichung, so kann diese entweder durch eine nachgelagerte **Produktendkontrolle** durch die Qualitätssicherung erfasst werden, oder der nicht entdeckte Fehler wandert bis zum Kunden und stellt eine Reklamationsgrundlage dar.

Folgt man dem spezifischen Materialfluss am Beispiel der Edelstahlrohrfertigung, so werden die produzierten und fertigungssynchron geprüften Produkte, bevor diese zur Auslieferung freigegeben werden, durch den Werkssachverständigen in Hinblick auf die Qualitätsanforderungen des Kunden, entsprechend der anzuwendenden Normen und Regelwerke, geprüft. Da diese Qualitätssicherungsmaßnahmen zeitverzögert zum eigentlichen Produkterstellungsprozess durchgeführt werden, spricht man von einer off-line-Qualitätssicherung. Das **off-line-Fehlerentdeckungsrisiko**, welches als Widerpart zur Entdeckungswahrscheinlichkeit der klassischen FMEA zu sehen ist, beinhaltet die Häufigkeit mit der Fehler erst im Zuge der Endkontrolle erkannt werden und die damit verbundenen Mehrkosten für Ausschuss und Nachproduktion. Auch dieses Risiko kann wieder auf Basis zusammengeführter Daten automatisiert erhoben werden und ergibt ebenfalls wieder die Einheit €/lfm, wie in Abbildung 4.3-1 dargestellt.

Die Bedeutung eines Fehlers für den Kunden ist in Korrelation mit dem Reklamationsverhalten des bestehenden Kundenportfolios zu sehen. Wobei einerseits die Häufigkeit der auftretenden Reklamationen und andererseits der Umfang der Reklamation, quantifiziert durch direkt zuordenbare Kosten für z.B. Nacharbeit, Ersatzproduktion oder zu leistende Zahlungen zum **Reklamationsrisiko** verknüpft werden. Die dritte Teilkennzahl, das Reklamationsrisiko, stellt die monetäre Risikobewertung für die Nichtentdeckung einer Abweichung dar und verkörpert damit das Risiko, dass ein fehlerhaftes Produkt bis zum Kunden gelangt. Die Einheit für das Reklamationsrisiko ist ebenfalls €/lfm und erlaubt so die Verknüpfung mit den anderen bereits definierten Risikokennzahlen laut Abbildung 4.3-1.

An Hand dieser Beschreibung wird klar, dass die Bestimmung der Teilrisiken auf die Gegebenheiten einer kontinuierlichen Fertigung im Bereich der Halbzeugindustrie abgestimmt ist.

Um nun das **Gesamtrisiko** eines Fehlers bzw. einer Fehlerursache bestimmen zu können, werden alle drei genannten Teilrisiken zur **Risikoquantifizierungszahl (RQZ)**, nach Abbildung 4.3-1, miteinander verbunden. Anhand der Qualitätsabweichungsstruktur kann schrittweise eine Risikobetrachtung durch Bildung der RQZ für jeden Qualitätsabweichungstyp durchgeführt werden.

Abweichend von der Risikoprioritätszahl der FMEA erhält man durch die RQZ eine **monetäre Größe**, die auch direkt mit anderen Systemen verglichen werden kann, und nicht nur für relative Vergleiche verschiedener Fehler untereinander zu verwenden ist. Somit kann auch der Makel der FMEA, die Subjektivität, umgangen werden. Gemäß dem klassischen FMEA-Ansatz bleibt die Trennung zwischen interner Betrachtungsweise über Fehlerauftritts- und off-line-Fehlerentdeckungsrisiko und externer Betrachtungsweise über das Reklamationsrisiko gewahrt.

Die Ermittlung der Risikoquantifizierungszahl erfolgt auf Basis historischer Daten, die möglichst vollständig und präzise erhoben werden müssen, was eine funktionierende Betriebsdatenerfassung für die Fertigung, eine entsprechende Dokumentation der Qualitätssicherung und ein funktionierendes Reklamationsmanagement voraussetzt.

Die Risikoquantifizierungszahl stellt ein Beurteilungskriterium für das Management dar, um abschätzen zu können, unter welchem Risiko ein Produkt herstellbar ist. Dadurch wird einerseits die Transparenz der Entscheidungsgrundlagen für die Technologiewahl zukünftiger Investitionen erhöht und andererseits die strategische Festlegung eines akzeptablen Risikos, unter welchem ein Produkt herstellbar ist, möglich [53].

5 Realisierung eines Informationssystems für qualitätsgestütztes Risikomonitoring

Die Auseinandersetzung von Unternehmen mit dem Risikobegriff allgemein hat in den vergangenen Jahren stark zugenommen. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass sich **Qualität und Quantität der Risiken** verändert haben. Durch Entwicklungen wie geforderte Expansionssteigerung, expansive Globalisierung oder Vergrößerung der Kapazitäten nehmen die Verwundbarkeit und somit die Risiken in Unternehmenslandschaften zu. Das Abwägen von Chancen und Risiken ist von jeher das ureigenste Geschäft eines Managers. Jedoch gewinnt unter diesen sich ändernden Rahmenbedingungen ein professioneller Umgang mit dem Risikobegriff zunehmend an Bedeutung, da viele Entscheidungssituationen, auch aus ethischen Gründen, nicht nur der Einschätzung der handelnden Personen überlassen werden dürfen. Man spricht immer häufiger von Enterprise-Risk-Managementsystemen (ERM), die von Unternehmen systematisch in das bestehende Managementsystem eingebunden werden und somit Entscheidungsträger auf allen Ebenen unterstützen sollen [76].

Inhaltlich lässt sich der bewusste Umgang mit Risiken in einem Enterprise-Risk-Managementsystem im wesentlichen immer durch die folgenden **vier logischen Schritte** definieren, um die Balance zwischen Risiko und Chance zu erreichen [66]:

- Risikovermeidung
- Risikoreduzierung
- Überwälzen von Risiken
- Risiko selbst tragen

Entsprechend dieser möglichen Maßnahmen versucht man kontinuierlich das Gesamtrisiko zu reduzieren. Jedoch funktioniert diese Art des Risikomanagements nur dann, wenn die **Risiken explizit** vorliegen. Deshalb versucht man in Unternehmen möglichst viele Risiken zu erfassen, zu bewerten und Prioritäten festzulegen. Genau für einen solchen Anwendungsfall bietet sich die Verwendung der Methodik der FMEA an [67].

Ein solcher ERM-Ansatz ist nicht als zentrales Tool für das Top-Management gedacht, sondern soll vielmehr alle Mitarbeiter für das Thema Risiko sensibilisieren und die Wahrnehmung schärfen. Speziell Entscheidungsträgern auf allen Ebenen soll eine Hilfestellung zur Erhöhung der Transparenz gegeben werden. Bei der praktischen Umsetzung eines risikogestützten Managementsystems stellt der **Faktor Mensch** den größten Einfluss und auch den häufigsten Grund für Ineffizienz und Scheitern dar. Aus diesem Grund sollte als Ergänzung zu allen notwendigen Maßnahmen zur Schaffung eines gemeinsamen Normen- und Wertegerüsts als Basis für ein ERM-System, für die Implementierung des Risikobegriffs in die operativen Tätigkeiten der Linienfunktionen, ein quantifiziertes Risiko verwendet werden. Wie schon für das Beispiel einer Fertigung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren ausgeführt, müssen solche Systeme entsprechend auf die **individuellen Gegebenheiten** des betrachteten Prozesses angepasst werden. Dabei erscheint es sehr wichtig sich am Informationsbedarf und dem Einsatzzweck unterschiedlicher Hierarchiestufen für ein risikogestütztes Analysetool zu orientieren. Um ein auf diese Anforderungen angepasstes

Informationssystem für ein ERM-System mit dem Grundgedanken der ständigen Verbesserung des gesamten Unternehmens strukturieren zu können, wird der Begriff „**unternehmensweiter PDCA-Zyklus**“ verwendet.

PDCA steht dabei für eine kontinuierlich durchlaufene Abfolge der Phasen **Plan** (Planung), **Do** (Umsetzung), **Check** (Kontrolle) und **Act** (Reaktion). Diese Betrachtungsweise kann grundsätzlich auf alle Prozesse und Prozessschritte eines Unternehmens angewendet und stets als Rückkopplungsschleife gesehen werden [65].

Dieser Prozess wird durch eine kontinuierliche Erhebung von Risikokenngrößen, entsprechend Abschnitt 4, im Sinne einer **quantitativen FMEA** durchgeführt. Dadurch können die nachgewiesenen Vorteile der FMEA genutzt und trotzdem Risiken explizit monetär bestimmt werden.

5.1 Methodischer Einsatz als unternehmensweiter PDCA-Zyklus

Alle Aktivitäten des Unternehmens im Umgang mit Risiken werden als Risikomanagement bezeichnet. Dabei werden unter anderem als Ziele die Verbesserung der Planbarkeit und der Steuerbarkeit des Unternehmens, die Optimierung der Finanzierungsquellen und die Erhöhung des Unternehmenswerts ins Auge gefasst [56].

Diese Zielsetzungen sind sehr mächtig und allgemein gefasst, sodass für die effiziente Umsetzung eines **Informationssystems**, das sowohl eine Risikobetrachtung auf operativer Ebene, als auch eine ganzheitliche Risikoanalyse auf normativ-strategischer Ebene abbilden soll, eine entsprechend klare Struktur geschaffen werden muss. Dabei soll eine klare Trennung zwischen laufend angewendeten Elementen des Risikomanagements im Zuge der Ausübung der Linienfunktionen und der langfristig orientierten unternehmensübergreifenden Betrachtung erfolgen. Jedoch ist es dazu nötig auch entsprechend klar definierte Schnittstellen zu schaffen, um eine Kommunikation zwischen strategischer und operativer Ebene zu gewährleisten. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Abbildung des qualitätsgestützten Risikomonitoring in einem Unternehmen am **Risikomanagement-Prozess** zu orientieren.

Eine Untersuchung der Umsetzung von Enterprise-Risk-Managementsystemen in verschiedenen Unternehmen zeigt deutlich, dass es eine einheitliche Tendenz zur Abbildung als Kreislaufprozess gibt. Entsprechend des Starnberger Risiko-Managementmodells kann der Einsatz von Risikomanagement in Unternehmen nach vier Elementen gegliedert werden.

- Risikomanagement-Prozess
- Risikomanagement-Organisation
- Risikomanagement-Risikofelder
- Risikomanagement-Methoden & Tools

Der Risikomanagement-Prozess stellt dabei die zeitliche und inhaltliche Abfolge der Abläufe zur Umsetzung des Risikomanagements dar. Dieser Kreislaufprozess wird in regelmäßigen Abständen durchlaufen und setzt sich aus den Phasen Risikoidentifikation, Risikobewertung, Risikobewältigung und Risikomonitoring zusammen [76].

Der Kreislaufprozess des Risikomanagements, welcher durch ein Risikoinformationssystem unterstützt wird, kann nach dem Modell nach Deming als PDCA-Zyklus abgebildet werden. Dabei wird die Risikoidentifikation, das Risikoassessment und die Risikopriorisierung dem Prozessabschnitt Plan, die Erstellung eines Aktionsplans dem Prozessschritt Do, das Controlling dem Prozessschritt Check und das Einholen eines Feedbacks dem Prozessschritt Act zugeordnet. Jedoch kann dieser Zyklus erst dann sinnvoll durchlaufen werden, wenn entsprechende Zielvorgaben gesetzt wurden, da ohne Ziele keine Risiken definiert werden können [67].

Auf diesen Überlegungen aufbauend soll die Methodik einer quantifizierbaren FMEA, auf Basis der Risikoquantifizierungszahl, als **zweifach ausgeführtes Bewertungskreismodell** in ein Managementsystem eingebunden werden. Wie in Abbildung 5.1-1 dargestellt, umschließt der **globale Bewertungskreis** das Unternehmen im Sinne eines PDCA-Zyklus in Bezug auf die Aufbaustruktur von der normativen über die strategische bis hin zur operativen Ebene. Da ein solcher Risikomanagement-Prozess **Zieldefinitionen als Input** benötigt, startet die Phase **Plan** auf normativer Ebene, wobei aus Richtungsvorgaben des Eigentümers oder allgemein formulierten Zielsetzungen einer Generalversammlung die nötigen Eingangsgrößen für die Risikobetrachtung abgeleitet werden können. Unabhängig von dem Vorhandensein eines ERM-Systems, erfolgt die strukturierte Überleitung normativer Aufgabenstellungen bis auf die operative Ebene durch entsprechende Prozessschritte. Das Risikomanagement soll in dieser Betrachtung nicht als Nebenprozess oder Stabsfunktion in einem Unternehmen betrachtet werden. Vielmehr soll das Tool einer quantifizierbaren Risikobetrachtung die bestehenden Prozesse ergänzen. Normative Vorgaben können beispielhaft im Sinne der Entwicklung einer Unternehmensstrategie konkretisiert werden. Als Ergebnis eines solchen **Strategiemeetings** können klare Aussagen darüber zur Verfügung stehen, welche Märkte man gegenwärtig bedient und welche Marktsegmente man hinzugewinnen möchte, welche Produkte dazu nötig sind und welcher Produktionstechnologie man sich bedienen möchte. Auf diesen Ergebnissen aufbauend ist des den Unternehmensbereichen Marketing und Vertrieb möglich, gezielt eine **Marktbearbeitung** vorzunehmen. Dabei beschränkt man sich in der Regel auf eine kaufmännische Bewirtschaftung der Themen, die gerade für Produkte mit Neuigkeitswert nur bis zur Kundenanfrage führen kann. Ab diesem Prozessschritt ist die Einbringung einer prozesstechnologischen Sichtweise fast unumgänglich. Praktisch kann dies durch eine technische **Machbarkeitsprüfung** abgebildet werden, deren Zweck in der Klärung der Fertigbarkeit eines Produkts unter definierten Rahmenbedingungen liegt. Erfolgt eine positive Beurteilung in Bezug auf die Fertigbarkeit eines Produkts kann die Planungsphase fortgesetzt werden, welche durch die konkrete Eintaktung der Produktionsaufträge im Zuge der **Auftragsplanung** abgeschlossen wird. Die Prozessphase **Do** wird durch den Kernprozess eines Unternehmens, also für einen Produktionsbetrieb den **Produkt- oder Leistungserstellungsprozess**, abgebildet. Auf Basis der erhobenen Daten aus dem **Controlling** der Produktionsabwicklung und dem **Reklamationsmanagement**, welche der Prozessphase **Check** zuzurechnen sind, kann eine gezielte Rückkopplung auf die normative und strategische Ebene erfolgen, was der Prozessphase **Act** entspricht. Abweichungen, die im Zuge der Produkterstellung, oder Probleme, die bei der Anwendung durch den Kunden, aufgetreten sind, können so konsequent wieder in die mittel- und langfristigen Entscheidungen einfließen.

Durch die Ergänzung des Risikomanagements über eine solche Systematik, kann der Forderung Rechnung getragen werden, dass es die Aufgabe eines modernen ERM-Systems wäre **Entscheidungsgrundlagen** sowohl auf operativer als auch auf strategischer Ebene bereitzustellen [76].

In der praktischen Anwendung des Konzepts eines unternehmensweiten PDCA-Zyklus bedeutet dies, dass aus operativ generierten Erfahrungen, welche über die RQZ quantifiziert werden, Grundlagen für strategische Entscheidungen in der Planungsphase geschaffen werden. Somit kommt es auch zu einer strukturierten Dokumentation von angewandtem Wissen, welches im Zuge des Produkterstellungsprozesses sukzessive aufgelaufen ist. Es wird somit ein Beitrag dazu geleistet, **stillschweigendes Wissen**, das subjektiv und erfahrungsbasiert ist, kontinuierlich in **explizites Wissen**, welches als objektiv und rationalbasiert einzustufen ist, umzuwandeln.

Dieser Vorteil, der Verwendung eines hierarchieübergreifenden Kreislaufprozesses, zeigt sich als besonders groß, da tendenziell Kernkompetenzen von Unternehmen auf stillschweigendem Wissen basieren. Soziales Wissen und Erfahrungswissen werden somit in ihrer Entstehung zugelassen, wo es zur Förderung der Schaffung von Ideen eingesetzt werden kann, aber kontinuierlich durch die Betrachtung auf Systemebene „Prozess“ und „Produkt“ erfasst und über die Risikobetrachtung auf objektive, rationale Standards gebracht [77].

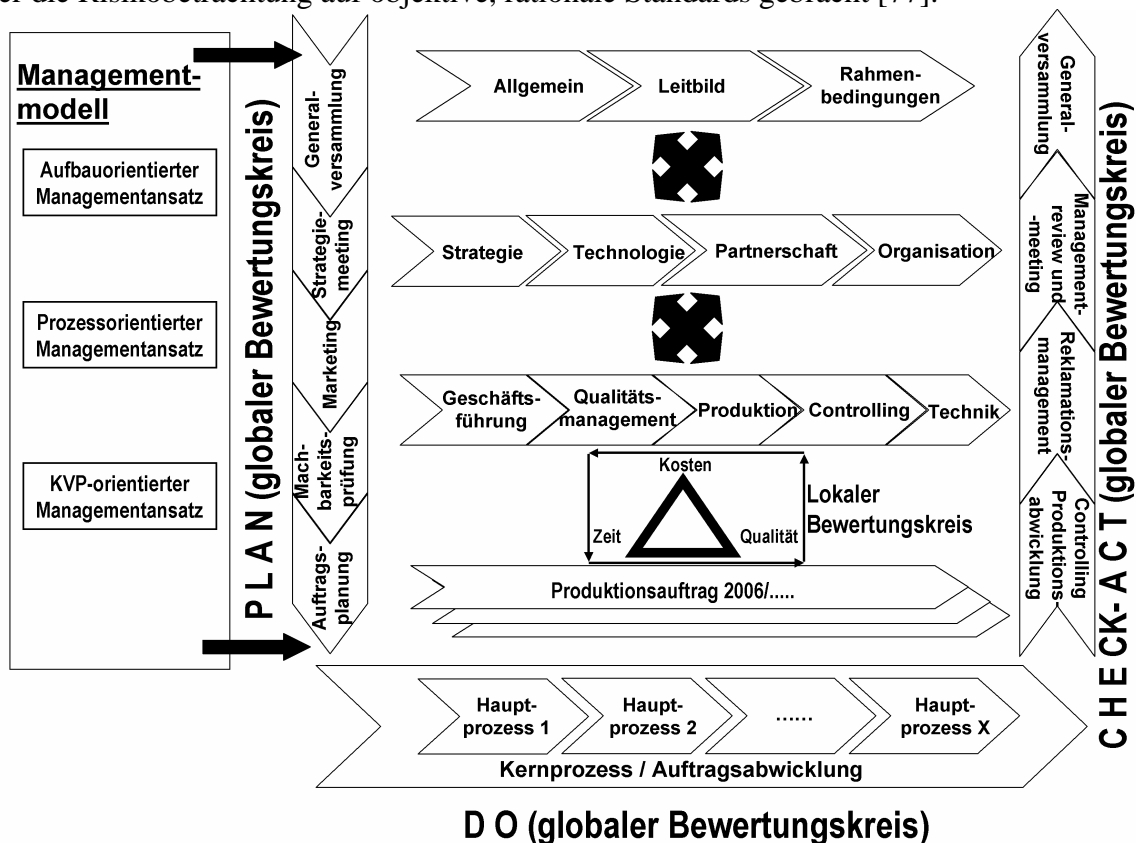


Abbildung 5.1-1: Modell eines qualitätsgestützten Risikomonitoring auf Basis von aufbauorientiertem und KVP-orientiertem Managementansatz [57]

Durch die höhere Transparenz für die strategische Entscheidungsfindung ist es möglich, laut Abbildung 4.1-1, aus Stärken und Schwächen der verwendeten Fertigungstechnologie sowie den Chancen und Gefahren am Markt durch Verknüpfung mit den zuordenbaren Risiken einen Marketing-Mix festzulegen. Entsprechend der damit **festgelegten Qualitätsstrategie** können Vorgaben (Toleranzvorgaben, Kostenvorgaben für risikogestützte Kalkulation) für die operative Abwicklung im Zuge des **lokalen Bewertungskreises** zwischen Verkauf, Produktion und Qualitätsmanagement abgeleitet werden.

Für die Funktion eines effizienten Risikomanagements spielt die Abbildung als geeignete Software-gestützte Lösung eine zentrale Rolle. Die Nutzung moderner Informationstechnologien zur Sammlung und Verdichtung von Daten spielt vor allem für die Quantifizierung des Risikos eine große Rolle. Dies ist aus dem Grund von Interesse, da die mangelnde Identifikation und Bewertung von Risiken auf Grund unbefriedigender Quantifizierung als eine der größten Schwächen der Risikoanalyse gesehen wird [56].

Aus diesem Grund muss in Zusammenhang mit der Implementierung des unternehmensweiten PDCA-Zyklus als Risikomonitoringsystem auch eine entsprechende **Softwarelösung** gefunden werden, die die benötigten Daten zur Risikobestimmung erheben, verdichten und bereitstellen kann. Dabei ist es nötig, Daten aus den Bereichen Produktion, Qualitätssicherung und Reklamationsmanagement miteinander zu verknüpfen. Die gesammelten Informationen aus Betriebsdatenerfassung, Dokumentation der qualitätssichernden Maßnahmen und Reklamationsbearbeitung sind am sinnvollsten in einem **OLAP-Datenwürfel** (online analytical processing [79]) zu aggregieren, sodass sie im Sinn von „fallenden Daten“ für Auswertungen zur Verfügung stehen. Die Datenerhebung soll Synergien mit den bestehenden Arbeitsabläufen und –dokumenten aufweisen um die Risikobestimmung als Mehrwert und nicht als Mehraufwand wahrnehmen zu können.

Das Erheben der Daten und die Quantifizierung der Risiken erfolgt entsprechend Abbildung 5.1-1 auf Basis der dreiteiligen Gliederung der RQZ beim Durchlaufen des lokalen Bewertungskreises. Dabei sind die Teilkennzahlen der RQZ verursachungsgerecht den **operativen Verantwortungsbereichen** zugeordnet. Die Ermittlung des Fehlerauftrittsrisikos ist sinngemäß der produktionsverantwortlichen Abteilung zuzuordnen. Diese Abläufe sind dem Prozessschritt Controlling Produktionsabwicklung laut PDCA-Zyklus zuzurechnen. Ebenfalls unter diesen Sammelbegriff fällt die Qualitätskontrolle durch die Qualitätssicherung. Für das Anwendungsbeispiel einer Fertigung längsnahtgeschweißter Edelstahlrohre stellen qualitätssichernde Maßnahmen am fertigen Produkt eine Ergänzung zu fertigungssynchroner automatisierter Prüfung dar. Aus diesem Grund soll die Produktendkontrolle als off-line-Qualitätssicherung bezeichnet werden, der die Bestimmung des off-line-Fehlerentdeckungsrisiko zugeordnet ist. Die Ermittlung der dritten Teilkennzahl der RQZ, dem Reklamationsrisiko, fällt in den Verantwortungsbereich des Reklamationsmanagement und ist im entsprechenden Prozessschritt abzubilden.

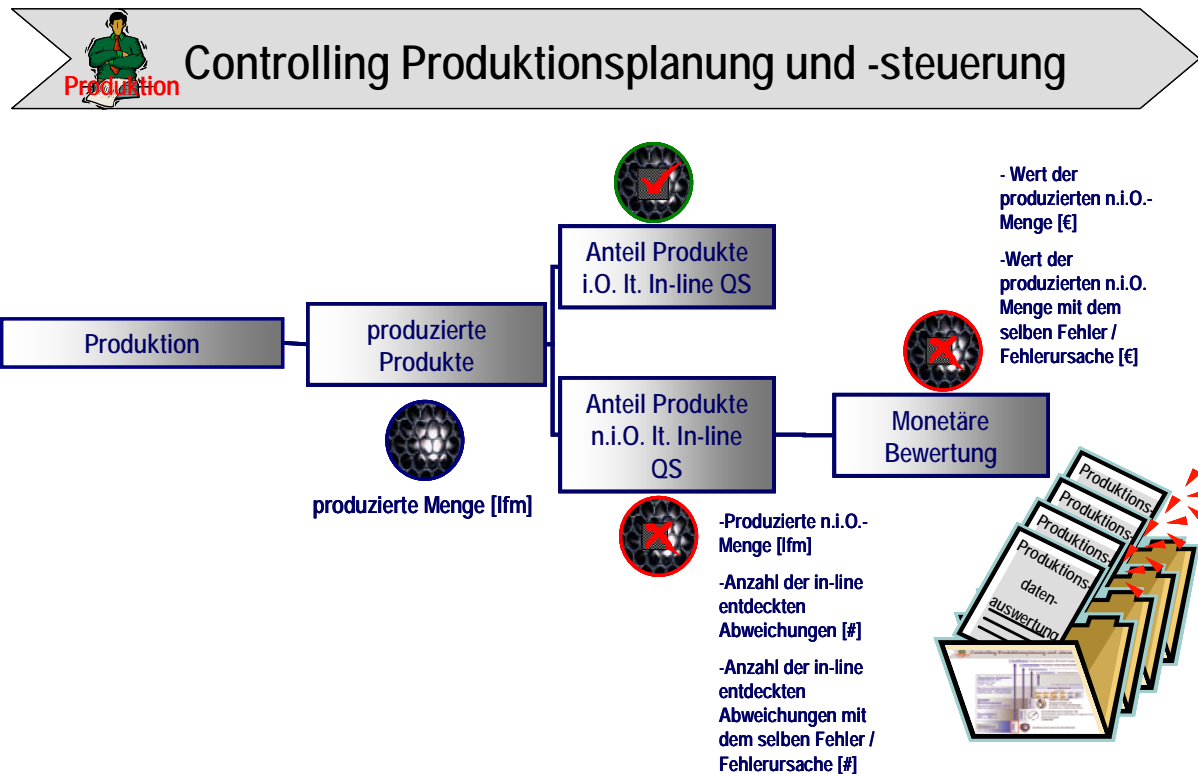


Abbildung 5.1-2: Bestimmung des Fehlerauftrittsrisikos im Zuge des Prozessschritts Controlling Produktionsplanung und –steuerung

Im Sinne einer Produktionsdatenauswertung zur Effektivitätsbetrachtung des Produkterstellungsprozesses nach Abbildung 3.3-1, welche im Zuge des Controllings durch die **Produktionsplanung und –steuerung** durchgeführt wird, können, wie in Abbildung 5.1-2 dargestellt, die zur Bestimmung des **Fehlerauftrittsrisikos** nötigen Daten erhoben werden. Aus der gesamt produzierten Menge kann durch Erhebung von Schrott und Ausschuss und durch eine nachgelagerte Bewertung mit den Stückkosten für die Herstellung der Wert der produzierten Ausschussmenge (n.i.O.-Menge) berechnet werden. Weiters erfolgt die Bestimmung der Anzahl des Auftretens einzelner Fehlertypen. Nach Abbildung 5.1-3 kann aus diesen Basisdaten eine Risikobestimmung für das bereits in Abschnitt 4 verwendete Beispiel des Produkts Fittingrohr erfolgen. Dabei ergibt sich die Bedeutung der Fehlerfolge, bezeichnet als Fehlerbedeutung, aus dem Verhältnis des Werts der hergestellten n.i.O.-Menge und der Gesamtanzahl der fertigungssynchron entdeckten Abweichungen. Die Fehlerauftrittshäufigkeit ergibt sich durch Division der Anzahl der automatisch entdeckten Abweichungen eines Fehlertyps durch die gesamt produzierte Menge. Dementsprechend ergibt sich aus der Multiplikation aus Fehlerauftrittshäufigkeit und Fehlerbedeutung, laut Definition in Abbildung 4.3-1, das Fehlerauftrittsrisiko in €/lfm. Somit ist die Tätigkeit der Risikobetrachtung für den Produktionsbereich in den Ablauf der Produktionsdatenauswertung integriert und kann auf Grund der Abstimmung auf die Gegebenheiten ohne nennenswerten **Mehraufwand** erfolgen. Zur Ermittlung der stückbezogenen Produktionskosten sei auf Abbildung 4.2-2 verwiesen.

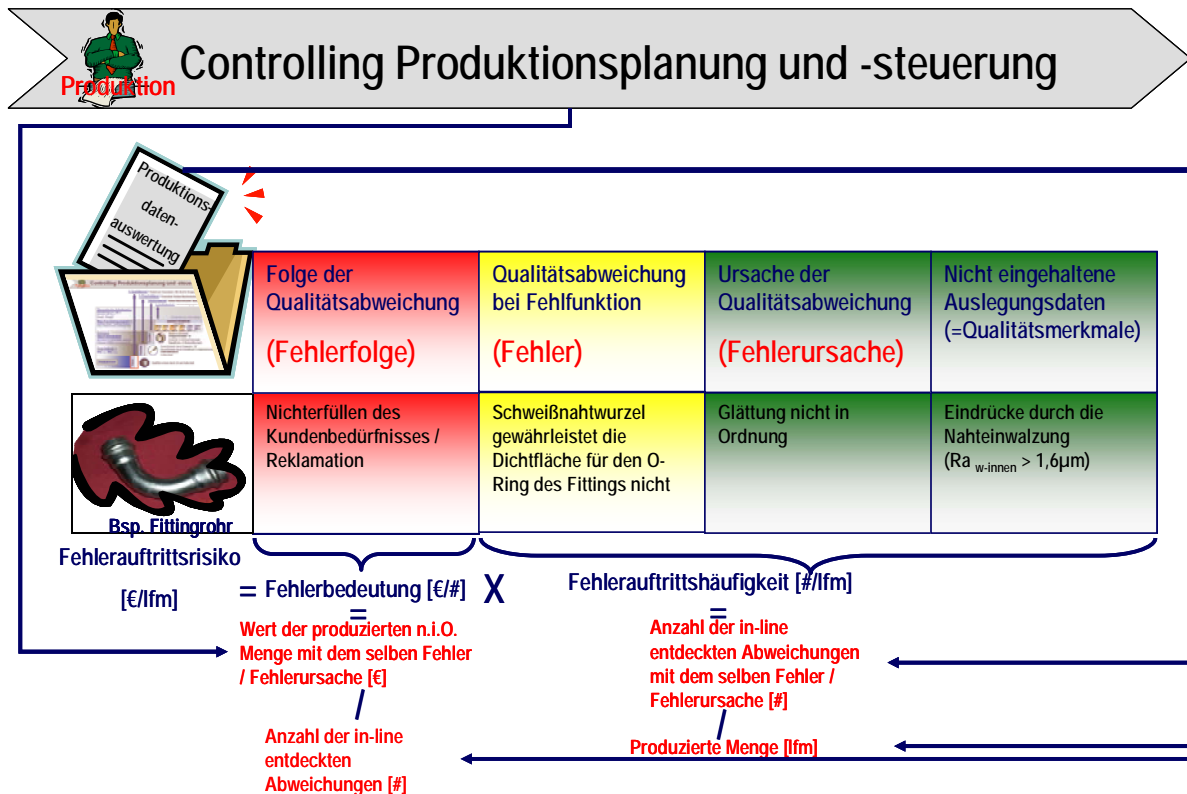


Abbildung 5.1-3: Beurteilung des Fehlerrisikos im Sinne einer quantifizierbaren FMEA am Beispiel Fittingrohr

Entsprechend Abbildung 5.1-4 wird die Anzahl, der im Zuge einer Endabnahme entdeckten Fehler am Produkt durch die **Qualitätssicherung** ermittelt. Dabei erfolgt die Kontrolle auf Basis der durch den Kunden spezifizierten Anforderungen. Sollte sich eine Abweichung einstellen, so kann dieses Produkt nicht durch die handelnde Person freigegeben werden. Jedoch muss eine Nichterfüllung eines untergeordneten Qualitätsmerkmals nicht zwangsläufig den Einsatz beim Verbraucher ausschließen. Aus diesem Grund können Produkte, die zwar Abweichungen aufweisen und somit als n.i.O-Teile deklariert sind, trotzdem durch eine Freigabe des Kunden oder der Geschäftsführung als Gutteile deklariert werden. Unter Berücksichtigung dieses Umstandes lässt sich die Anzahl an aufgetretenen Abweichungen, sowohl gesamt als auch für einen bestimmten Fehlertyp ermitteln. Das zugehörige Arbeitsdokument, welches beispielhaft im Bereich der Qualitätssicherung eingesetzt werden kann, ist das **Abnahmeprotokoll**, welches zur Aufnahme der Daten in EDV-Form abgebildet sein sollte. Speziell im Bereich der Rohrindustrie ist dieser Begriff des Abnahmeprotokolls sehr weit verbreitet. Dieses Arbeitsdokument sollte, laut Abbildung 5.1-5, bereits so strukturiert sein, dass eine direkte Zuordnung der Begrifflichkeiten „Fehler“, „Fehlerursache“ und „Fehlerfolge“ möglich ist. Somit ist auch eine entsprechende Systematisierung möglich, die eine abgestimmte Risikobestimmung ermöglicht. Die Vorgehensweise der FMEA mit diesen Begriffen umzugehen, kann somit auch zur Erstellung des Abnahmeprotokolls dienen. Auf Basis der Kontrolle der Qualitätsmerkmale des Produkts laut **Produktionsauftrag**, kann eine Dokumentation der Abweichung zur Beschreibung des Fehlers erfolgen. Zur Bestimmung der Fehlerursache sollte als nächster Schritt die Evaluierung der Ursache für die Abweichung in Bezug auf den Produkterstellungsprozess erfolgen. Die Fehlerfolge wird durch die Beurteilung der Abweichung auf Basis der vorliegenden Kundenanforderungen unter möglicher Einbindung des Kunden bestimmt. Ergänzend zu den drei Begrifflichkeiten

der FMEA sind zur Vervollständigung des Abnahmeprotokolls auch interne, kundenbezogene Sofortmaßnahmen und Abstellmaßnahmen abzuleiten. Somit ist es auch möglich die unmittelbar zuordenbaren Abweichungskosten zu bestimmen.

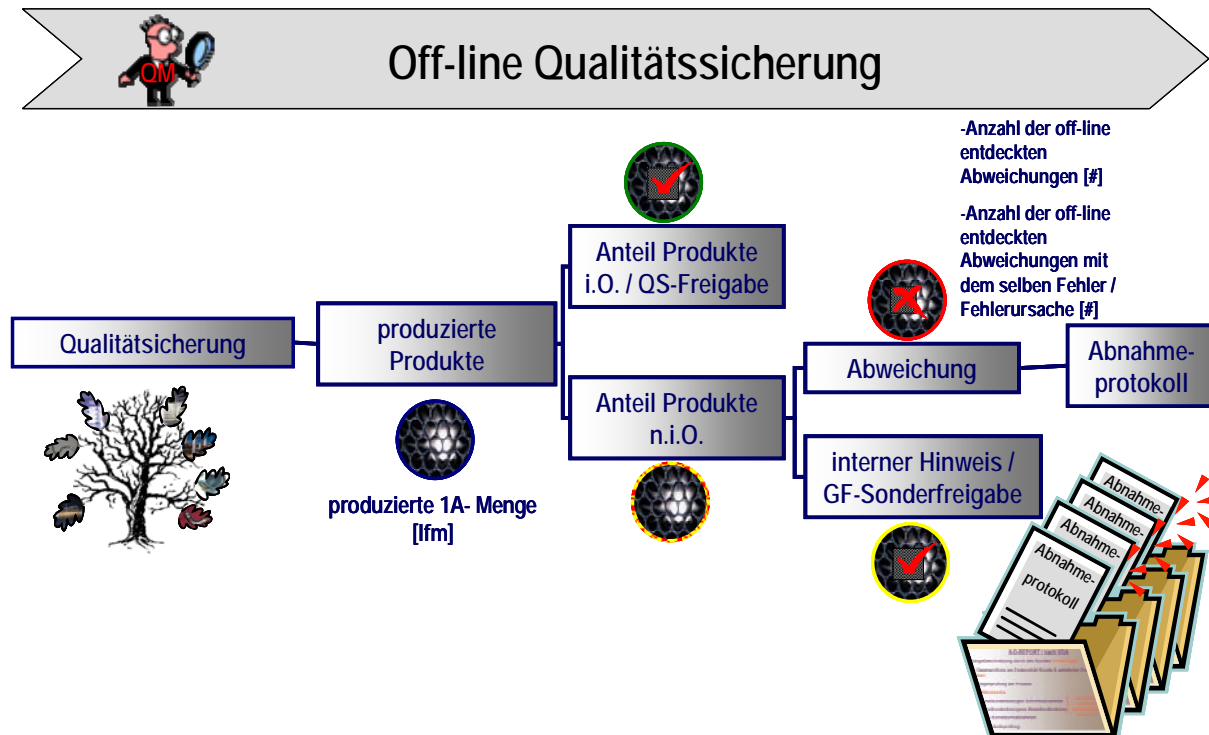



Abbildung 5.1-4: Bestimmung des Off-line-Fehlerentdeckungsrisikos im Zuge des Prozessschritts Qualitätssicherung

Nach vollständiger Datenerhebung kann das **off-line-Fehlerentdeckungsrisiko**, nach Abbildung 5.1-6, bestimmt werden. Dazu ist das Verhältnis aus unmittelbar zuordenbaren Abweichungskosten für einen Fehlertyp und der Gesamtanzahl off-line-entdeckter Abweichungen zu bilden, um zur Bedeutung off-line-entdeckter Abweichungen zu gelangen. Die Abweichungshäufigkeit wird durch die Anzahl der off-line-entdeckten Abweichungen eines Fehlertyps im Verhältnis zur produzierten 1-A-Menge gebildet. Der Grund, hier nicht die Gesamtproduktionsmenge zu verwenden, liegt darin, dass es sich bei der RQZ um eine mehrstufige Kennzahl handelt. Jede Teilkennzahl soll dabei isoliert für ihre Bestimmung betrachtet werden. Somit ist der Betrachtung der off-line-Qualitätssicherung die gesamte zu prüfende Menge, was der 1-A-Menge ohne Schrott und Ausschuss entspricht, als Bezugsgröße zu verwenden. Dementsprechend ergibt sich, nach der Definition in Abbildung 4.3-1, das „off-line-Fehlerentdeckungsrisiko“ aus der Multiplikation von „Bedeutung off-line entdeckter Abweichungen“ und der „Abweichungshäufigkeit“ mit der Einheit €/lfm.

 Off-line Qualitätssicherung

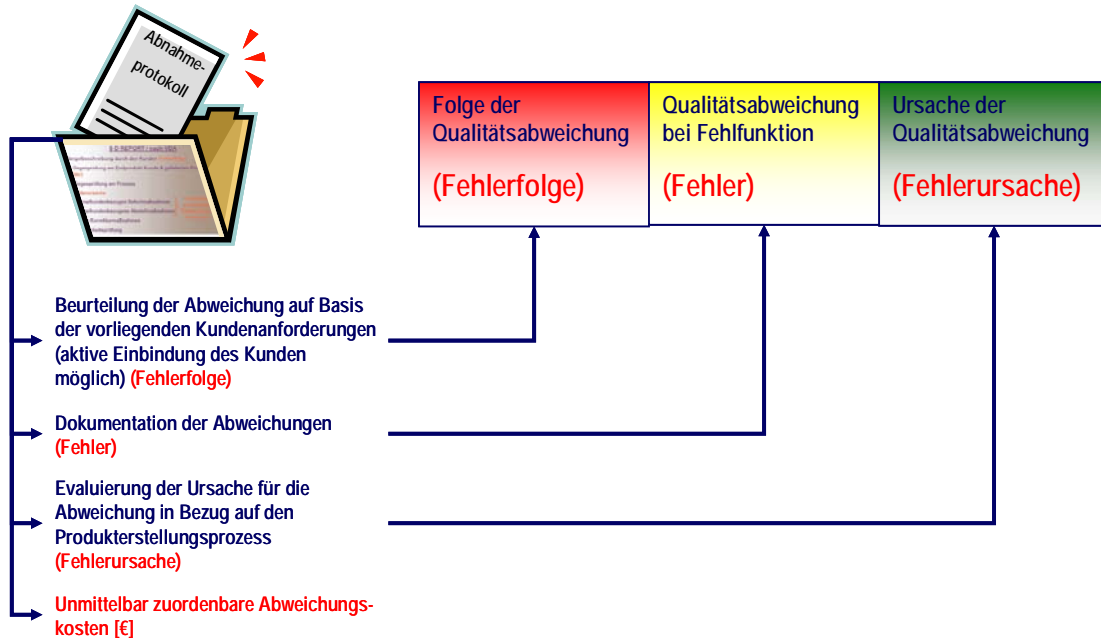


Abbildung 5.1-5: Erhebung von Off-line-entdecketen Fehlern durch die Qualitätssicherung

 Off-line Qualitätssicherung

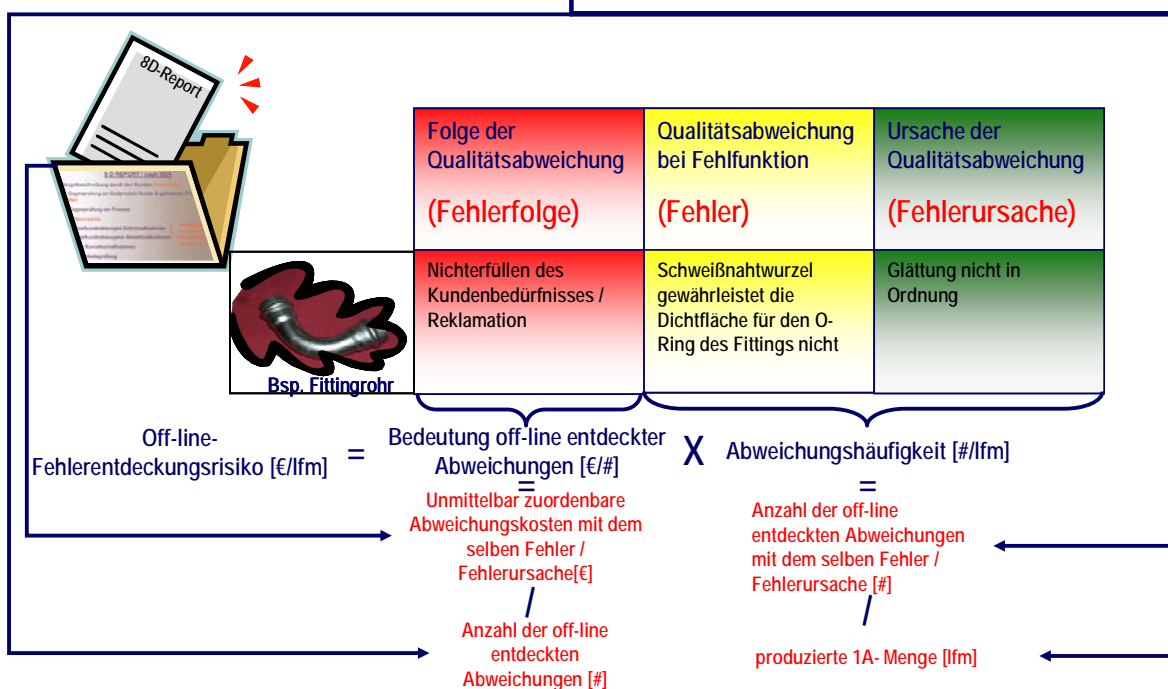


Abbildung 5.1-6: Beurteilung des Off-line-Fehlerentdeckungsrisikos im Sinne einer quantifizierbaren FMEA am Beispiel Fittingrohr

Für die Bestimmung des **Reklamationsrisikos** liegt als Bezugsmenge die Gesamtheit gelieferter Produkte zu Grunde. Eine **Reklamation** wird in der Regel durch eine Abweichung ausgelöst, die unerkannt bis zum Kunden gelangt und eine Fehlerfolge verursacht. Da die meisten Produkte auch beim Kunden einer Wareneingangsprüfung unterliegen, muss ein fehlerhaftes Produkt nicht unbedingt während seines Einsatzes im Endprodukt versagen, sondern kann auch vorab erkannt werden. Aus diesem Grund ergibt sich das Szenario, dass zwar Qualitätsabweichungen unerkannt bis zur Wareneingangskontrolle des Verarbeiters gelangen, dort jedoch als verwendbar eingestuft werden. In solchen Fällen wird der Lieferant sehr häufig unter dem Begriff des **Hinweises** auf die Abweichung aufmerksam gemacht, ohne dass jedoch aktiv Korrekturmaßnahmen am Produkt ergriffen werden müssten. Werden gelieferte Teile jedoch als nicht verwendbar eingestuft, oder es kommt bereits im verarbeitenden Zustand zum Versagen, so wird der Lieferant zur Reaktion gezwungen, was im Regelfall mit Kosten verbunden ist.

Zur Abwicklung und Dokumentation eines Reklamationsfalles auf Grund von Produktabweichungen dient für den Bereich der Automobilindustrie das Arbeitsdokument **8-D-Report** [80].

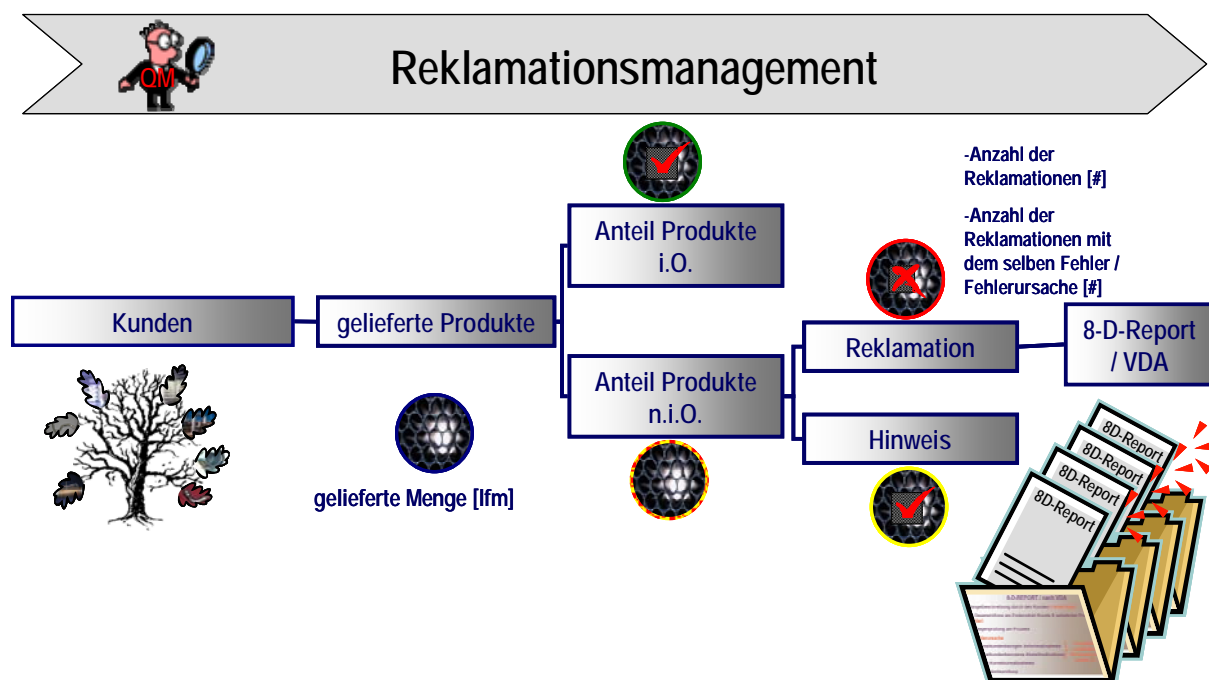


Abbildung 5.1-7: Bestimmung des Reklamationsrisikos im Zuge des Prozessschritts Reklamationsmanagement

Somit ist die Anzahl der Reklamationen, die als Größe für die Ermittlung des Reklamationsrisikos benötigt wird, durch die Statistik über die erstellten 8-D-Reports ableitbar. In Analogie zum Abnahmeprotokoll können auch aus den Informationen des 8-D-Reports die Begriffe Fehlerfolge, Fehler und Fehlerursache nach der FMEA-Systematik abgeleitet werden. Die Fehlerfolge leitet sich dabei aus der Mängelbeschreibung des Kunden ab. Zur Beschreibung des Fehlers eignen sich die Ergebnisse aus der Prüfung am Endprodukt des Kunden und am gelieferten Produkt. Die Bestimmung der Fehlerursache stellt einen integralen Bestandteil der 8-D-Report-Erstellung dar. Parallel können auch hier die Reklamationskosten, die zur Bewertung der Risikobedeutung benötigt werden, über die

Kosten der getätigten Sofortmaßnahmen und die nachhaltigen Abstellmaßnahmen erhoben werden. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 5.1-8 und 5.1-9 dargestellt.

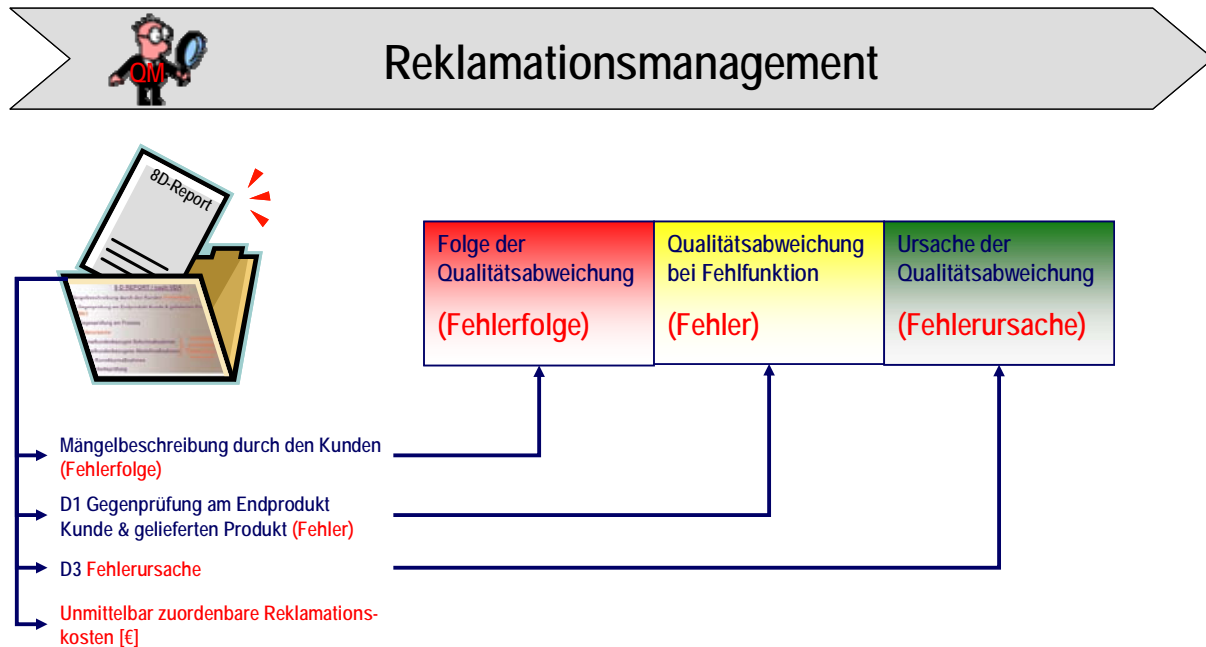


Abbildung 5.1-8: Erhebung von zum Kunden gelangten Fehlern durch das Reklamationsmanagement

Auf Basis dieser Daten kann nun die Ermittlung des Reklamationsrisikos ohne nennenswerten Mehraufwand erfolgen. Die Reklamationsbedeutung wird durch das Verhältnis aus Reklamationskosten und Gesamtanzahl der Reklamationen bestimmt. Zur Abbildung der Reklamationshäufigkeit dient die Anzahl der Reklamationen, die sich auf eine bestimmte Qualitätsabweichung bezieht, gebrochen durch die gesamt gelieferte Menge als Bezugsgröße, womit sich auch hier die Einheit €/lfm ergibt.

Ein wesentlicher **Vorteil des Konzepts** einer Risiko basierenden Umsetzung des unternehmensweiten PDCA-Zyklus gegenüber der Informationsbereitstellung in klassischen Risikomanagementsystemen liegt in der **Vereinfachung der Risikoidentifikation** durch eine messbare Datengrundlage. In konventionellen ERM-Systemen erfolgt die Anwendung in Bezug auf mittel- und langfristige Zeithorizonte. So wird ein Risikomanagement-Prozess um strategische Aussagen ableiten zu können, in vielen Fällen nur einmal jährlich durchlaufen. Durch das Arbeiten mit „fallenden Daten“ zur Risikobestimmung ist es in diesem Konzept möglich die **Prozessdurchlaufzeiten individuell** an die Notwendigkeiten der unterschiedlichen Anwendungsgebiete anzupassen. In der Regel nimmt die Durchauffrequenz auf niedrigerer Hierarchieebene zu. So wird die Risikobestimmung, -analyse und -auseinandersetzung für den lokalen Bewertungskreis auch unterjährig ständig durchlaufen, da dieser unmittelbar in die Abläufe der Linienfunktionen eingebunden werden kann. Diese **hohe Intensität** mit der die Methodik für den **globalen Bewertungskreis** zum Einsatz kommt, bietet die Möglichkeit einer durchgängigen Daten- und Wissensgenerierung, die somit eine **stabile Basis** für die Aufnahme in den **globalen Bewertungskreis** liefert.

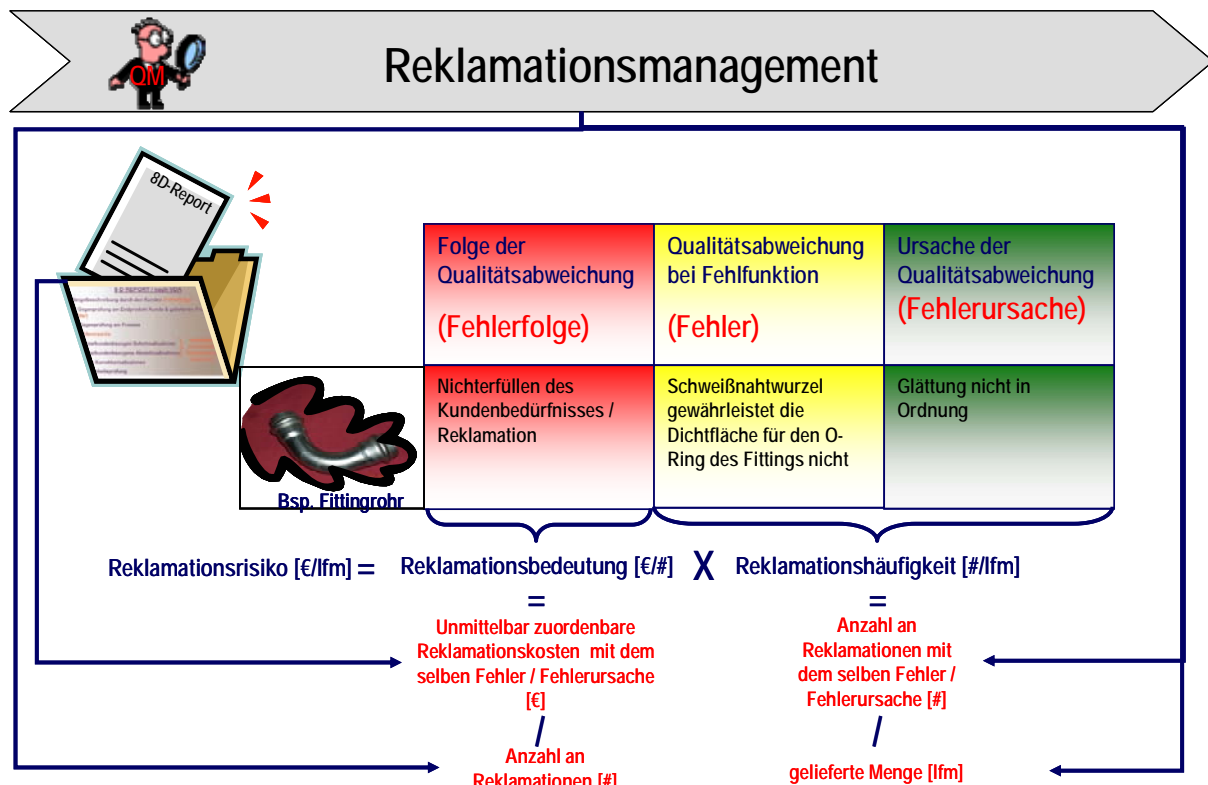


Abbildung 5.1-9: Beurteilung des Reklamationsrisikos im Sinne einer quantifizierbaren FMEA am Beispiel Fittingrohr

Der globale Bewertungskreis wird mit geringerer Häufigkeit durchlaufen, da es sich hierbei eher um mittelfristige Entscheidungen des strategischen Managements handelt. Jedoch ist es auch hier möglich die Intervalle frei und je nach Notwendigkeit zu wählen, da eine vorgelagerte Phase expliziter Erhebung von Entscheidungsgrundlagen entfällt. Durch die Anwendung des risikogestützten Informationsmodells ist das Risikomanagement somit nicht als isolierte Insellösung zu sehen, die keinen unmittelbaren Wert für die operative Tätigkeit bieten kann, sondern stellt durch die **unmittelbare Integration** in die bestehenden Prozesse eine Möglichkeit dar, das Verständnis für den Risikogedanken mit hoher Durchdringung im Unternehmen zu implementieren. Durch die kontinuierliche Anwendung der FMEA-Methodik ist es möglich, das unternehmensweite Lernen und die Generierung von explizitem, dokumentiertem Wissen ohne zusätzliche Systematik umzusetzen. Dabei erfolgt eine **Verdichtung des Wissens** von unten nach oben in Bezug auf die hierarchischen Ebenen. Der Dokumentations- und Zeitaufwand, der für viele Risikomanagementsysteme und die dabei angewendeten Methoden ein Hemmnis für die Umsetzung vor allem in kleinen Unternehmen darstellt, kann durch die Sammlung und Auswertung historischer Daten minimiert werden. Somit ist auch ein **effizientes Controlling** des Risikos in Bezug auf alle Prozessschritte möglich. Getätigte Abstellmaßnahmen können in Bezug auf den Kosten-Nutzen-Zusammenhang durch den Vergleich mit der Entwicklung der Risikoquantifizierungszahl transparent beurteilt werden.

5.2 Mehrdimensionale Risikodarstellung als Entscheidungsfindungstool

Die Integration der Stimme des Kunden in die Überlegungen der Mitarbeiter eines Unternehmens ist in allen Phasen des Produktlebenszyklus eine Mussanforderung. Denn nur so kann ein gestärktes Verhältnis zwischen Kunden und Lieferant, ein verbessertes Verständnis der Marktbedürfnisse und eine Senkung der Fehlerraten erzielt werden. Aus diesem Grund ist der Begriff der Qualität methodisch abzubilden, wozu im weiteren die Qualitätsmerkmalsstruktur verwendet werden soll.

Eine solche Vorgehensweise ermöglicht die **Relativierung der Sichtweise des Kunden** und schafft Transparenz durch Übersetzung in die Bedeutung für den eigenen Produktionsprozess. Somit können Missverständnisse zwischen Kunden und Lieferanten verringert werden und es wird auch für den Hersteller möglich, aktiv eine geeignete Kundenauswahl zu treffen [78].

Die Frage, ob ein Produkt mit den zur Verfügung stehenden Fertigungstechnologien **wirtschaftlich umsetzbar** ist, hat für ein Unternehmen strategischen Charakter. Eine solche Fragestellung kann jedoch nicht in trivialer, dualistischer Form beantwortet werden. Die Methodik zur Bildung der Risikoquantifizierungszahl stellt eine Möglichkeit für die Entscheidungsträger dar, um beurteilen zu können, unter welchem Risiko ein Produkt herstellbar ist. Die **Grenze des akzeptablen Risikos** kann durch das strategische Management vorgegeben werden. Somit wird einerseits die Transparenz der Entscheidungsgrundlagen für die Technologiewahl zukünftiger Investitionen erhöht und andererseits die strategische Festlegung eines akzeptablen Risikos, unter welchem ein Produkt herstellbar ist, möglich.

Die Durchführung einer mehrdimensionalen Risikobetrachtung kann sowohl im Zuge des globalen Bewertungskreises als auch des lokalen Bewertungskreises erfolgen. Eine solche Betrachtung schließt, nach Abbildung 4.1-1, sowohl interne und die externe Sichtweise ein. Dazu ist eine Abbildung der **Qualität der Produkte** in Zusammenhang mit den **Möglichkeiten der Prozesstechnologie** nötig, wobei die Verknüpfung der beiden Begriffe über den Bewertungsmaßstab des Risikos erfolgen kann. Man erhält aus der Qualitätsmerkmalsstruktur die zugehörige Qualitätsabweichungsstruktur, wodurch die Begriffe Qualität und Fehler auf den Anwendungsfall „längsnahtgeschweißtes Rohr“ heruntergebrochen werden können. Verknüpft man dementsprechend die **Qualitätsmerkmals- und Qualitätsabweichungsstruktur**, zur Abbildung von Qualität und der damit verbundenen Fehler, mit dem resultierenden, über die RQZ bestimmten Gesamtrisiko, so erhält man die Möglichkeit einer **dreidimensionalen Qualität-Fehler-Risikobetrachtung**. Die benötigte Qualität eines Produkts kann nach den Bedürfnissen einzelner Marktsegmente gegliedert und somit das Risiko zur Fertigung entsprechend der verknüpften Qualitätsabweichungen dargestellt werden. Es kann mittels einer quantitativen, monetären Größe der Unterschied in der Qualität einer Schweißnaht für ein Edelstahlrohr zur Fertigung von Pressfittings im Vergleich zu unverformt eingesetzten Rohren, die im Anlagenbau verwendet werden, transparent dargestellt werden. Schematisch ist diese mehrdimensionale Risikobetrachtung in Abbildung 5.2-1 dargestellt.

Entlang der Achse Qualität können die Qualitätsanforderungen verschiedener Marktsegmente abgebildet werden. Die Darstellung des Qualitätsbegriffs erfolgt in normierter Form durch die Qualitätsmerkmalsstruktur. Durch den Aufbau der Systematik auf einem OLAP-Datenwürfel ist es möglich, die Qualitätsmerkmalsstruktur, die ja die Anforderungen an das Produkt

gegliedert nach relevanten Merkmalen beschreibt, sowohl für einzelne Produkte oder für Produktgruppen zu erheben. Zur Beschreibung der **Qualitätsachse** erfolgt die Bildung der Qualitätsmerkmalsstruktur gegliedert nach Marktsegmenten. Die Gliederung nach Marktsegmenten kann dabei nach Abbildung 4.1.1-2 erfolgen. Innerhalb jedes Marktsegments ist eine weitere Untergliederung nach einzelnen Punkten der Qualitätsmerkmalsstruktur, wie beispielsweise Schweißnaht, Oberfläche oder Rohrquerschnitt nach Abbildung 4.1.1-4, möglich. Somit kann durch die starke Verdichtung der Informationen die Heterogenität der Marktsegmente in Bezug auf die Qualitätsanforderungen und die zugehörigen Ursachen erkannt werden.

Die **Achse „Fehler“** wird durch die Qualitätsabweichungsstruktur beschrieben. Eine Untergliederung ergibt sich hier nach der Kategorisierung der auftretenden Fehlertypen. Der Begriff „Fehlertyp“ ist der Qualitätsabweichung bei Fehlfunktion gleichzusetzen und wird zur Vereinheitlichung durch die Fehlerursache, also durch die Ursache der Qualitätsabweichung, beschrieben. Somit ergibt sich als Beispiel für einen zu bildenden Fehlertyp, nach Abbildung 4.1.2-1, „Glättung nicht in Ordnung“. Da die Qualitätsabweichungsstruktur immer nur aus der Qualitätsmerkmalsstruktur abgeleitet werden kann, besteht immer eine eindeutige Zuordnung zwischen den Qualitätsanforderungen aus Marktsegmenten und Fehlertypen. Dadurch kann die Ebene Qualität-Fehler vollständig mittels messbarer Kriterien am Produkt abgebildet werden.

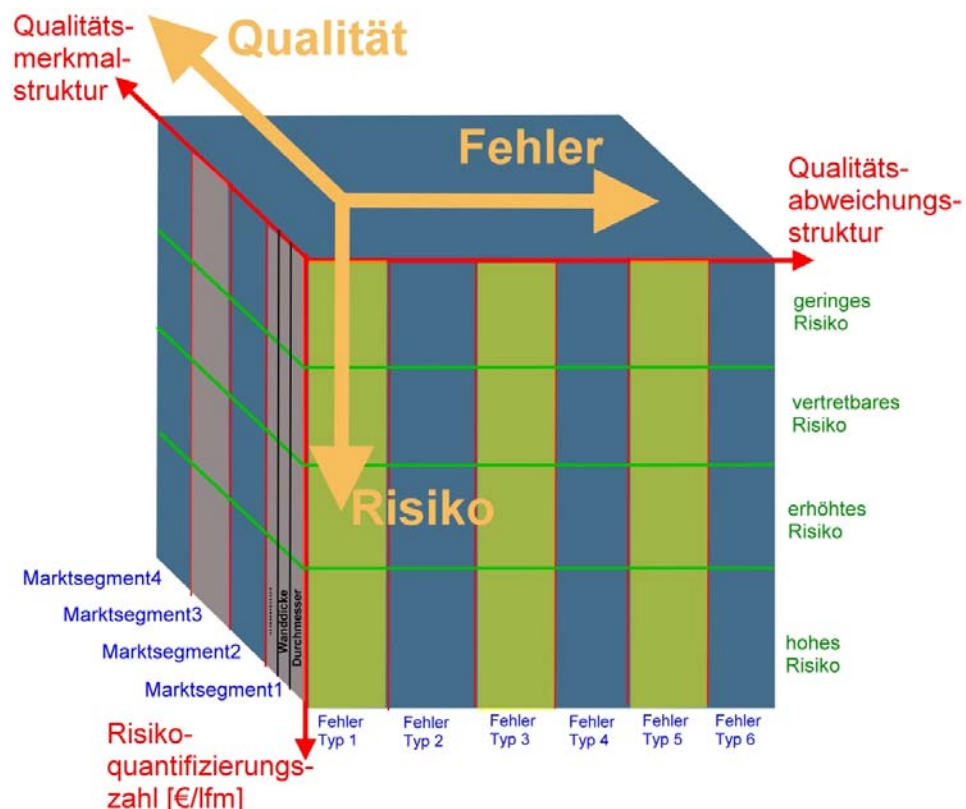


Abbildung 5.2-1: Mehrdimensionale Qualität-Fehler-Risiko-Betrachtung [75]

Die **dritte Achse, das Risiko**, dient nun zur Verknüpfung der Begriffe Qualität und Fehler. Durch die Ermittlung der Risikoquantifizierungszahl kann der Datenwürfel um diese Dimension erweitert werden. Die RQZ beantwortet, durch ihren dreiteiligen Aufbau, ganzheitlich die Frage, welches Risiko mit der Bedienung eines Marktsegmentes für das

gesamte Unternehmen verbunden ist. Es kann somit sowohl den **internen** als auch den **externen Einflüssen**, die sich durch eine Konstellation aus Marktanforderungen und Zustand des Unternehmens ergeben, Rechnung getragen werden. Beispielsweise können sich Unterschiede im Reklamationsverhalten von Kunden ergeben, die einem Marktsegment zuordenbar sind. Dieser Einfluss auf das sich ergebende Gesamtrisiko für die Erzeugung eines solchen Produkts wird durch die dritte Teilkennzahl, das Reklamationsrisiko, berücksichtigt. Für jeden Punkt der Ebene, die sich aus den Kategorien Fehler und Qualität aufspannt, lässt sich die Risikoquantifizierungszahl berechnen. Dieser Datenwürfel kann nun aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet und nach verschiedenen Ebenen geschnitten werden. Auch die **Wahl des Detaillierungsgrads** entlang der Kategorieachsen Qualität und Fehler ist variabel definierbar. Beispielsweise werden strategische Entscheidungen auf Geschäftsführer- oder Vorstandsebene eher einer gröberen Gliederung nach Marktsegmenten bedürfen, als jene für die Produktionsabwicklung übliche feine Gliederung nach Punkten aus der Qualitätsmerkmalstruktur darstellt. Auch in Bezug auf die Fehlertypen ist hier der Grad der Kleinteiligkeit frei wählbar. Für einen groben Überblick wird man sich mit einer Aussage begnügen wie beispielsweise, dass von der Schweißnaht das größte Risiko für die Fertigung von Produkten für ein bestimmtes Marktsegment ausgeht. Um technische Verbesserungen erzielen zu können, wird man mit dieser Betrachtungsweise jedoch nicht das Auslangen finden und eine detailliertere Aufschlüsselung der Fehlertypen wählen. Weiters besteht auch die Möglichkeit den **Betrachtungsrahmen** für die Tragweite eines Fehlers einzuengen, indem ergänzend zur Darstellung des Gesamtrisikos durch die RQZ, eine der drei Risiko-Teilkennzahlen verwendet wird. Um nur den Bereich der Produktion isoliert betrachten zu können, kann die Risikoachse nur durch das Fehlerauftrittsrisiko beschrieben werden. Dieser Datenwürfel aus den Achsen Qualität, Fehler und Risiko bietet somit die Basis für die Aufbereitung von Entscheidungen für das gesamte Unternehmen. Der jeweilige Fokus der Betrachtung kann durch den Entscheidungsverantwortlichen dabei bestimmt werden.

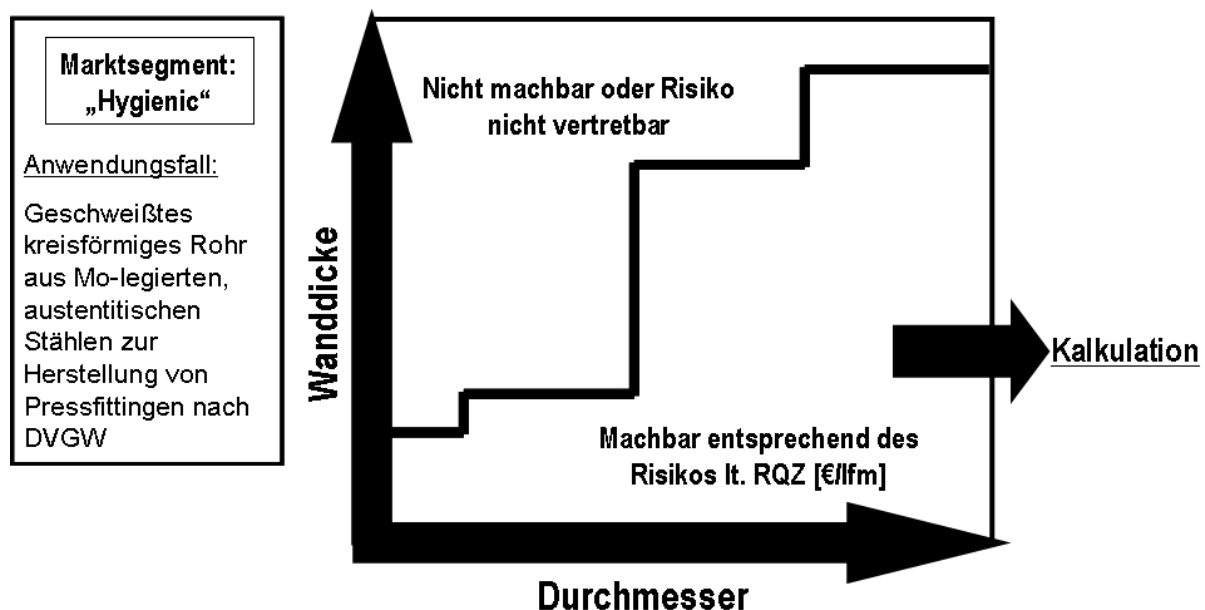


Abbildung 5.2-2: Risikoorientierte Rohrmachbarkeitsmatrix [75]

In Abbildung 5.2-2 ist als Beispiel für eine solche Entscheidungsfindung eine **Machbarkeitsmatrix** für das Produkt Edelstahlrohr hinsichtlich der Produktmerkmale

Rohraußendurchmesser und Rohrwanddicke dargestellt. Eine solche Machbarkeitsmatrix ist als Methode klar dem **lokalen Bewertungskreis** zuzuordnen. Dabei erfolgt das Durchlaufen des PDCA-Zyklus für die Produkterstellung im Sinne der Auftragsanbahnung durch den Vertrieb, der Auftragsplanung, der operativen Durchführung der Fertigung, dem Controlling durch Produktionsplanung und –steuerung, der Qualitätssicherung und dem Reklamationsmanagement. Parallel dazu werden die Teilkennzahlen zur Bildung der RQZ ermittelt. Die Gliederung der erhobenen Risiken nach Produktmerkmalen für die Fertigung unterschiedlicher Produkte soll als **Entscheidungskriterium für die Annahme von Kundenaufträgen** im Zuge der Geschäftsanbahnung dienen. Durch die Festlegung eines akzeptablem Risikos für die Herstellung eines Produkts ergibt sich eine natürliche Grenze der Machbarkeit. Das maximal zulässige Risiko als Vorgabewert ist in der Regel Ergebnis einer strategischen Entscheidung und stellt somit die **Verknüpfung zum globalen Bewertungskreis** dar. Es muss somit keine Analyse des Herstellungsportfolios Produkt für Produkt durchgeführt werden, sondern kann an Hand einer generellen Vorgabe erfolgen. Neben dem Mehrwert, den eigenen Produkterstellungsprozess in Bezug auf nachgefragte Produkte im Rahmen der Geschäftsanbahnung quantifizieren zu können, ermöglicht die RQZ eine direkte Berücksichtigung in der Kalkulation auf Grund der **monetären Bewertung**. Weiters ermöglicht die auftragsbezogene Bestimmung der RQZ im Sinne einer **Nachkalkulation** eine automatisierte Rückkopplung zur Machbarkeitsmatrix, wodurch sich ein selbstregelndes System für die operative Abwicklung ergibt.

6 Erfahrungen

In den folgenden Unterkapiteln wird die entwickelte Methodik zur Risikobetrachtung eines Herstellungsprozesses am Beispiel einer Fertigung geschweißter Edelstahlrohre auf ihre Anwendbarkeit untersucht. Im Sinne der Einbindung als Managementwerkzeug, wie in Kapitel 5 beschrieben, müssen verschiedene Anwendungsfälle unterschieden werden. Dabei orientiert man sich ausgehend von einer überblicksartigen Sichtweise, wie sie für den Prozessschritt „Plan“ auf strategischer Ebene denkbar ist, hin zu einer detaillierten Betrachtung für die Anwendung auf technisch-operativer Ebene. Dabei erfolgt auch eine Verengung des Fokus vom Gesamtprozess über den reinen Produkterstellungsprozess bis zum einzelnen Fertigungsschritt. Die Betrachtung des Herstellungsprozesses im Sinne einer Risikobetrachtung liefert als Ergebnis, welche Teilprozesse der Fertigung einer genaueren Analyse unterzogen werden müssen.

6.1 Anwendungsfälle

Der Inhalt dieses Kapitels stützt sich auf gemachte Erfahrungen aus der Anwendung der Methode zur Risikoanalyse in einem **Rohrwerk** zur Herstellung längsnahtgeschweißter Edelstahlrohre. Dabei wurde nicht nur eine Produktionsanlage isoliert betrachtet, sondern die gesamte Fertigung, bestehend aus neun Rohrstraßen, einer Analyse unterzogen. Als Grundlage dienten die erhobenen Daten aus Produktion, Qualitätsmanagement und Reklamationsmanagement aus fünf Geschäftsjahren.

Zur Ermittlung der benötigten Informationen aus dem Bereich der Produktion war es notwendig Systeme zur Produktivitätsbetrachtung des Herstellungsprozesses einzuführen. Somit war die Möglichkeit einer **geschlossenen Betriebsdatenerfassung** zur Bestimmung der Arbeitszeitkaskade entsprechend Abbildung 3.3-1 gegeben.

Entsprechende Systeme zur Datenaufzeichnung in den Bereichen Qualitätssicherung und Reklamationsmanagement waren bereits vorhanden und konnten genutzt werden.

Um eine auswertbare Datengrundlage zu schaffen, mussten die in den drei verschiedenen Bereichen erhobenen Daten entsprechend aggregiert werden. Um der Notwendigkeit einer vollständigen Auswertbarkeit der Datenbestände Rechnung tragen zu können, erfolgte die Anwendung des On-Line-Analytical-Processing-Konzepts (OLAP) [83]. Somit ist es möglich, eine dynamische und multidimensionale Risikobestimmung auf Basis historischer, konsolidierter Datenbestände durchzuführen.

Die organisatorische Einbindung der Risikoermittlung in die vorhandenen Prozesse orientierte sich an dem Modell eines qualitätsgestützten Risikomonitoring nach Kapitel 5. Durch die Anwendung eines OLAP-Würfels kann ein sehr effizientes Analysesystem umgesetzt werden, da alle Auswertungen auf „fallenden Daten“ [84] basieren. Als Modell für die Strukturierung des Datenwürfels diente Abbildung 5.2-1.

Der betrachtete Herstellungsprozess zur Fertigung längsnahtgeschweißter Präzisionsedelstahlrohre ist auf die Erfordernisse der **Produktnorm DIN 17457**, wie unter Kapitel 3.1.2 dargestellt, ausgerichtet. Betrachtet man die Herstellungsarten für Edelstahlrohre, nach Abbildung 3.1.1-1, so können die, für diesen Anwendungsfall betrachteten Rohrstraßen, den Verfahren mit kontinuierlicher Einformung unter Anwendung des **Walzprofilierens** zugeordnet werden. Als Schweißverfahren kommt **WIG-Schweißen**

zum Einsatz. Das verschweißte Rohr durchläuft, analog zu Abbildung 3.2.3-2, mehrere nachgelagerte Umformoperationen zur Kalibrierung und eine **integrierte Wärmebehandlung**.

Die Ausrichtung der betrachteten Rohrfertigung bestand vor allem auf der Herstellung von folgenden **Hauptrohrarten** (vgl. Abschnitt 3.2):

- Leitungsrohre im Anlagenbau für chemische und petrochemische Anwendungen
- Wärmetauscherrohre zur Anwendung in aggressiven Medien
- Leitungsrohre in der Lebensmittelindustrie und Medizintechnik

Die Anwendung des Modells zur Risikoanalyse des Produkterstellungsprozesses für Edelstahlrohre wurde vor allem mit der **Zielsetzung** betrieben, Aufschluss darüber zu erhalten inwieweit neue Produkte zum Erfolg des Unternehmens beitragen könnten. Limitierende Faktoren in Bezug auf die Produktionstechnologie sollten ausgemacht und Verbesserungspotentiale transparent dargestellt werden können. Da **technische Optimierungsprojekte** mit einem hohen inhaltlichen Tiefgang verbunden sind, war eine getrennte Betrachtung der folgenden Teilprozesse notwendig.

- Schweißprozess zur Verbindung des Spaltes am Schlitzrohr
- Einwalzen der Schweißnaht
- Wärmebehandlung des Rohres

Dabei beschränkte man sich nicht nur auf eine reine Risikobetrachtung sondern führte in Bezug auf die Ergebnisse, gliedert nach Prozessschritten und zuordenbaren Qualitätsabweichungen, entsprechende Verbesserungsprojekte durch. Um Verständnis für die Zusammenhänge zwischen ökonomischen und technologischen Faktoren zu schaffen, ist eine zusammenfassende Darstellung der eingesetzten Technologie im Allgemeinen als auch in ihrer Anwendung nötig. Als Maßstab für die erzielte Verbesserung diente eine erneut durchgeführte Risikobestimmung.

6.1.1 Analyse eines Fertigungsprozesses geschweißter Edelstahlrohre

Zur Analyse des Ausgangszustandes eignet sich eine **gesamtheitliche Betrachtung des Produkterstellungsprozesses**. Dabei kommt im Folgenden die Gliederung nach den beiden Hauptachsen „Qualität“ und „Fehler“, wie in Abbildung 5.2-1, zum Einsatz. Die entwickelte Qualitätsmerkmalsstruktur, welche in ihrer Form universell auf das Produkt „Rohr“ angewendet werden kann, muss nach Abbildung 4.1.2-1 in die zugehörige Qualitätsabweichungsstruktur übergeführt werden. Dieser Schritt dient auch dazu die **Qualitätsmerkmalsgruppen** mit **Qualitätsabweichungsgruppen** zu verknüpfen, die schon wesentlich spezifischer auf den konkreten Anwendungsfall orientiert sind. Diese Vorgehensweise erwies sich als sehr zweckmäßig, da die Sammlung und Zuordnung von Daten durch eine angepasste Nomenklatur wesentlich vereinfacht werden konnte.

In Tabelle 6.1.1-1 wird eine Übersicht über die verwendete Gliederung der Qualitätsmerkmals- und Qualitätsabweichungsstruktur gegeben. Jeder Kategorie sind entsprechende Variablen zur Bestimmung der Risikokomponenten zugeordnet. Zur Beschreibung der dritten Achse nach Abbildung 5.2-1, dem Risiko, kommen sowohl die Risikoquantifizierungszahl als auch die Teilrisikokennzahlen zum Einsatz.

Qualitätsabweichungen werden in diesem Zusammenhang durch die **zugehörige Fehlerursache** beschrieben. Diese Vorgehensweise schafft die Überleitung von der anwendungsbezogenen Sicht auf das Endprodukt hin zur herstellungsorientierten Sicht auf das erzeugte Halbzeug. Nach Abbildung 4.1.2-1 wird somit der Fehler durch die Fehlerursache beschrieben. Je höher die Anzahl an unterschiedlichen Fehlerursachen, desto wichtiger ist eine entsprechende Gliederung, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten. Aus diesem Grund ist die Qualitätsabweichungsstruktur für diesen Anwendungsfall zweistufig aufgebaut. Je nach Komplexität können Qualitätsabweichungen (Fehler, beschrieben durch die Fehlerursache) zu Qualitätsabweichungsgruppen (Fehlergruppen, beschrieben durch die Fehlerursachen) zusammengeführt werden, wodurch sich **zwei Detaillierungsebenen** ergeben. Eine entsprechende Übersicht über die verwendete Gruppierung ist in Anhang 7.1 zusammengestellt.

Qualitätsmerkmalsstruktur	Qualitätsabweichungsstruktur				
Qualitätsmerkmalsgruppe	Qualitätsabweichungsgruppe	Risikoquantifizierungszahl	Fehlerauftretensrisiko	Off-line-Fehlerdeckungsrisiko	Reklamationsrisiko
Allgemein	Anlauffarbe	RQZ 6	FAR 6	FER 6	RR 6
Allgemein	Glättung nicht in Ordnung	RQZ 7	FAR 7	FER 7	RR 7
Ausrichtung	krumme Rohre	RQZ 11	FAR 11	FER 11	RR 11
Länge	Länge zu kurz / zu lang	RQZ 5	FAR 5	FER 5	RR 5
Oberfläche	Oberflächenfehler innen / außen	RQZ 9	FAR 9	FER 9	RR 9
Rohrquerschnitt	Maße nicht in Ordnung	RQZ 12	FAR 12	FER 12	RR 12
Schweißnaht	Schweißnahtfehler	RQZ 1	FAR 1	FER 1	RR 1

Tabelle 6.1.1-1: Ableitung der Qualitätsmerkmals- und Qualitätsabweichungsstruktur Edelstahlrohr

Betrachtet man beispielsweise die Qualitätsabweichungsgruppe „Schweißnaht“, so kann nach Tabelle 6.1.1-1, für die auftretenden Qualitätsabweichungen in diesem Bereich die Ursache unter dem Begriff „Schweißnahtfehler“ zusammengefasst werden. Da dieser Begriff sehr vielfältige Ausprägungsformen haben kann, ist es nötig eine weitere Gliederung durchzuführen. Nach Anhang 7.1 sind der **Kategorie „Schweißnahtfehler“** folgende, nicht mehr weiter unterteilbare Fehlerursachen zuzuordnen:

-
- **Schweißaussetzer** Normverweis: [A.1] Schweißnaht durchgeschweißt / [E] (5.9) Dichtheit
 - **Spannungsrisse** Normverweis: [E] (5.9) Dichtheit / [C] (5.4) mechanisch und technologische Eigenschaften
 - **Poren** Normverweis: [D.2] (Tab. 6) Oberflächenbeschaffenheit
 - **Nicht Durchgeschweißt** Normverweis: [A.1] Schweißnaht durchgeschweißt / [E] (5.9) Dichtheit
 - **Kantenversatz** Normverweis: [F.4] (DIN 2463 Pkt. 4.3 - Tab. 2) Wanddicke / [D.2] (Tab. 6) Oberflächenbeschaffenheit
 - **Danebengeschweißt** Normverweis: [A.1] Schweißnaht durchgeschweißt / [E] (5.9) Dichtheit
 - **Einbrand** Normverweis: [F.4] (DIN 2463 Pkt. 4.3 - Tab. 2) Wanddicke / [D.2] (Tab. 6) Oberflächenbeschaffenheit

Über die Verknüpfung mit dem zugehörigen Qualitätsmerkmal kann auch die Beziehung zur Produktnorm DIN 17457 über einen entsprechenden **Normverweis** hergestellt werden. Diese Zuordnung erfolgt über messbare Kriterien am Produkt entsprechend des Normenstrukturbaums nach Abbildung 4.1.1-3. Somit ist eine eindeutige Zuordnung zwischen quantifizierbarem Qualitätsmerkmal am Produkt, der zugehörigen Qualitätsabweichung und deren Ursache gegeben. Für die praktische Umsetzung ist es zwangsläufig nötig eine möglichst detaillierte Aufnahme aller auftretenden Fehlerursachen durchzuführen und diese entsprechend zu beschreiben. Als sehr geeignetes Mittel dazu, in Ergänzung zum Normenstrukturbaum, hat sich ein **Fehlerkatalog** sehr bewährt. Die grafische Aufbereitung und das Arbeiten mit Referenzmustern erleichtert vor allem die operative Bestimmung unterschiedlicher Qualitätsabweichungen. Weiters kann das Verständnis des Werkers für die Qualitätsansprüche gesteigert und die Zuverlässigkeit der erhobenen Daten gesteigert werden. Es bietet ein solches Werkzeug auch die Möglichkeit, klar zu kommunizieren, in welcher Art und Weise während des Herstellungsprozesses auftretende Qualitätsabweichungen erkannt werden können. In Bezug auf die betrachtete Fertigung lassen sich zwei Kategorien bilden:

- Qualitätsabweichungen durch laufende Kontrolltätigkeit des Anlagenbedieners bestimmbar (visuelle Prüfung, manuelle Messung,...) ... Typ A
- Qualitätsabweichungen durch automatisierte Prüfeinrichtungen detektierbar (Wirbelstromprüfung [85],...) ... Typ B

In Anhang 7.2 ist ein Auszug aus einem solchen Fehlerkatalog angefügt, wobei darauf hingewiesen wird, dass für den Einsatz nicht nur mit Abbildungen sondern vor allem auch mit Fehlermustern gearbeitet wurde.

Weniger komplexe Qualitätsabweichungsgruppen bedürfen keiner weiteren Untergliederung, wie am Beispiel „krumme Rohre“ deutlich gemacht werden kann. Es handelt sich hierbei um

Fehlerbilder, die eine sehr eindeutige Ausprägungsform haben und somit klar abgegrenzt und beschrieben werden können. Bezüglich der Verknüpfung zur Produktnorm sei auf Anhang 7.1 verwiesen.

Qualitätsmerkmale, die keiner eigenen Qualitätsmerkmalsgruppe zugeordnet werden können, werden unter dem **Begriff „Allgemein“** in der Qualitätsmerkmalsstruktur zusammengeführt. Typischerweise handelt es sich dabei um Qualitätsmerkmale, die klar durch einen Prozessschritt beeinflusst werden, aber unterschiedliche Bedeutung bei gleicher Ausprägung für den Endanwender haben können. Man orientiert sich für diese Fälle stärker am Einfluss einzelner Herstellungsschritte. Als charakteristisches Beispiel kann hier die Fehlerursache „Glättung nicht in Ordnung“ herangezogen werden. Die nachträgliche Umformung der Schweißnaht durch ein Überwalzen, wie unter Kapitel 3.1.2 als Normforderung nach DIN 17457 beschrieben, kann unterschiedliche Fehler für das Endprodukt bedingen. Dies ist auch daran zu erkennen, dass die Verknüpfung zur Produktnorm entsprechend des Normenstrukturbaums in Bezug auf sehr viele unterschiedliche Qualitätsmerkmale gegeben ist, wie in Anhang 7.1 zusammengefasst.

Derselbe Fall ergibt sich auch für das Qualitätsmerkmal „Korrosionsbeständigkeit“, welches ebenfalls der Qualitätsmerkmalsgruppe „Allgemein“ zugeordnet wurde. Auch hier spiegelt sich ein sehr heterogenes Anforderungsprofil für die Endanwendung wieder. Als qualitätsbestimmender Prozessschritt ist in diesem Zusammenhang eindeutig die Wärmebehandlung anzusehen, welche mit der Fehlerursache „Anlauffarbe“ verknüpft werden kann.

Um die methodisch festgelegte **Überleitung**, nach Kapitel 4.2, von **Systemebene „Produkt“** auf **Systemebene „Prozess“** durchführen zu können, erfolgt eine Zuordnung der Fehlerursachen zu einzelnen Prozessschritten. Diese Zuordnung nach Anhang 7.1 liefert das Entscheidungskriterium, welche Teile des Herstellungsprozesses, nach einer ganzheitlichen Prozessanalyse, einer technologischen Betrachtung unterzogen werden müssen.

Die Datenerhebung zur **Bestimmung der Teilkennzahlen**: Fehlerauftrittsrisiko, Off-line-Fehlerentdeckungsrisiko und Reklamationsrisiko erfolgte nach der in Abbildung 5.1-2, 5.1-4 und 5.1-7 beschriebenen Systematik.

Abbildung 6.1.1-1 zeigt die Auswertung der **Risikoquantifizierungszahl**, gegliedert nach der **Qualitätsabweichungsstruktur**. Es handelt sich somit um die Betrachtung der Achsen „Fehler“ und „Risiko“ gemäß der mehrdimensionalen Risikobetrachtung. Somit sind in dieser Betrachtung alle gefertigten Produkte ohne weitere Untergliederung oder Abgrenzung eingeschlossen. Diese Darstellung eignet sich sehr gut um einen Überblick über den gesamten Wertschöpfungsprozess des Unternehmens zu erhalten.

Vergleicht man nur die Risikoquantifizierungszahlen in Abbildung 6.1.1-1 untereinander, so ist klar ersichtlich, dass von **Schweißnahtfehlern das größte Risiko** ausgeht, durch eine auftretende Qualitätsabweichung die Funktion des Endprodukts nicht erfüllen zu können. Weiters folgen in Bezug darauf die Kategorien „Oberflächenfehler innen / außen“ und „Maße nicht in Ordnung“.

Betrachtet man die ermittelten Werte für die Risikoquantifizierungszahl in Relation zu den Stückkosten für die Herstellung der Edelstahlrohre, so wird die **geringe monetäre Bedeutung** ersichtlich. Geht man von Herstellungskosten je Laufmeter Edelstahlrohr zwischen 2 und 50 € aus (vgl. Tabelle 4.2-2), wobei hier die Haupteinflüsse in den Materialkosten und dem Laufmetergewicht zu sehen sind, so liegt das Gesamtrisiko einer Qualitätsabweichung im Bereich kleiner ein Prozent.

Aus diesem Grund liefert die Auswertung der Risikoquantifizierungszahl bei dieser gesamtheitlichen Betrachtung, vorrangig brauchbare Aussagen über die Bedeutung der

Qualitätsabweichungen in Relation zueinander. Das sich ergebende Bild spiegelt schon im Zuge dieser allgemeinen Auswertung die typischen Brennpunkte eines solchen Fertigungsprozesses für längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre wider.

Gliederung der RQZ nach der Qualitätsabweichungsstruktur

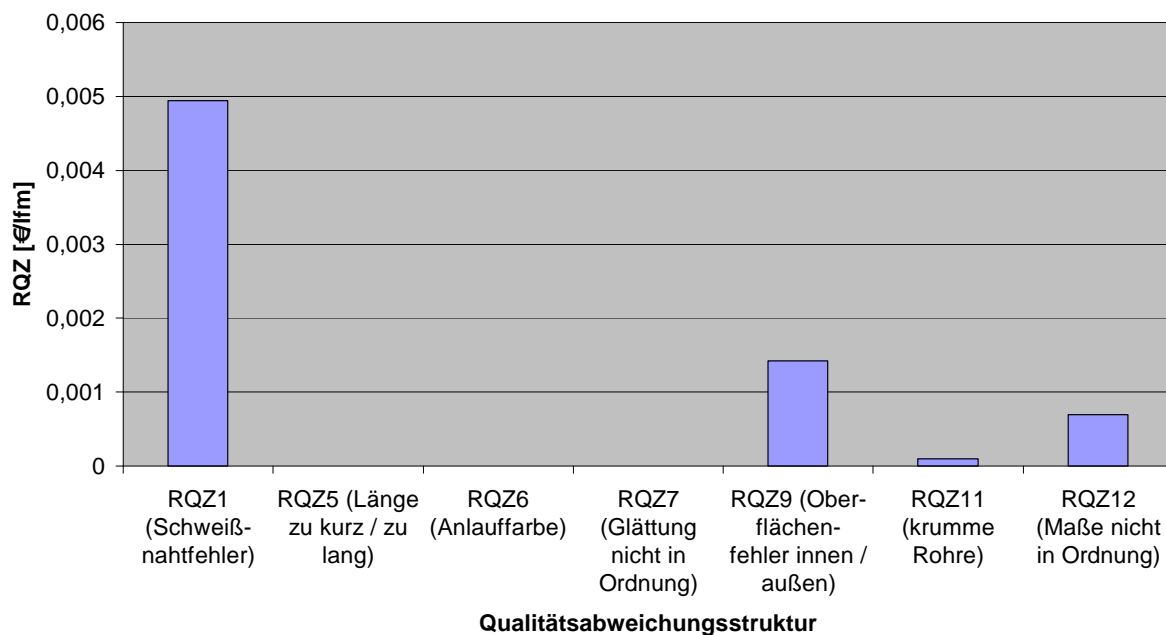


Abbildung 6.1.1-1: Gliederung der Risikoquantifizierungszahl nach Qualitätsabweichungsgruppen der Qualitätsabweichungsstruktur

Um auf die Zusammensetzung der RQZ eingehen zu können, ist eine Gegenüberstellung der **Teilkennzahlen zur Risikobestimmung** nötig. Die Auswertung erfolgt dabei wieder an Hand der **Qualitätsabweichungsstruktur**. Es handelt sich somit erneut um eine Abbildung der Fehler-Risiko-Ebene, jedoch werden als Maßstab für das Risiko die Teilkennzahlen der RQZ verwendet. Einen entsprechenden Überblick dazu liefert Abbildung 6.1.1-2.

Es ist deutlich zuerkennen, dass das Fehlerauftrittsrisiko im Prozess deutlich über dem Reklamations- und Off-line-Fehlerentdeckungsrisiko zu liegen kommt. Bildet man die Mittelwerte der betrachteten Risikokennzahlen über der Qualitätsmerkmalsstruktur, so ergeben sich folgende Werte:

- **Mittelwert Fehlerauftrittsrisiko:** 0,02426 €/lftm > 1% Stückkosten
- **Mittelwert Off-line-Fehlerentdeckungsrisiko:** 0,00014 €/lftm < 1% Stückkosten
- **Mittelwert Reklamationsrisiko:** 0,00651 €/lftm < 1% Stückkosten

Geht man von den zuvor verwendeten Bezugswerten für die Stückkosten aus, so kann nur das Fehlerauftrittsrisiko über einem Prozent des Warenwertes zu liegen kommen. In Bezug auf die Aussagekraft im Vergleich zu anderen Systemen ist dies immer noch zu niedrig. Jedoch lässt der Vergleich der Risikokennzahlen untereinander interessante Rückschlüsse zu. Qualitätsabweichungsgruppen, die sich durch **visuelle Kriterien** mit „unbewaffnetem“ Auge

beurteilen lassen oder durch **automatisierte Prüfeinrichtungen** fertigungssynchron detektiert werden können, werden mit höherer Wahrscheinlichkeit noch im Zuge des Produktionsprozesses erkannt und weisen deshalb geringeres Off-line-Fehlerentdeckungsrisiko und Reklamationsrisiko auf. Als Beispiele dafür können die Fehlergruppen „Schweißnahtfehler“, „Anlauffarbe“, „Glättung nicht in Ordnung“ und „krumme Rohre“ angeführt werden. Wie aus Anhang 7.2 ersichtlich ist, können die Mehrzahl dieser Fehler durch die Wirbelstromprüfeinheit automatisch erkannt werden.

Qualitätsabweichungen, die sich auf Qualitätsmerkmale beziehen, die **keiner 100%-Prüfung** unterzogen werden oder nur **qualitativ beurteilbar** sind, zeigen ein Reklamationsrisiko, welches über dem Fehlerauftritts- und Off-line-Fehlerentdeckungsrisiko zu liegen kommt. Als Beispiele können in diesem Zusammenhang die Kategorien „Oberflächenfehler innen / außen“ und „Maße nicht in Ordnung“ angeführt werden. Sowohl nach außen hin offene Inhomogenitäten als auch Fehler unter der Werkstückoberfläche können durch den Einsatz einer Wirbelstromprüfeinrichtung detektiert werden [85]. Sehr problematisch in Bezug auf die Erkennbarkeit sind fest anhaftende Verschmutzungen der Rohroberfläche, wie im Anhang 7.2 in Abbildung 7.2-10 dargestellte Glüherflecken. Solche Fehler können nur durch visuelle Kontrolle durch den Werker oder im Zuge der Off-line-Qualitätssicherung festgestellt werden. Zum Zeitpunkt der Durchführung dieser Risikoanalyse wurde noch an keiner der neun betrachteten Rohrstraßen eine automatische Durchmessermessung [86] verwendet. Durch den Einsatz optischer Systeme zur Kontrolle der Rohraußenkontur kann in Analogie zur Wirbelstromprüfung eine fertigungssynchrone 100%-Prüfung abgebildet werden. Durch das Fehlen eines solchen Systems, musste die Einhaltung der Qualitätsmerkmalsgruppe „Rohrquerschnitt“ ausschließlich durch manuelle Messungen abgebildet werden, worauf auch das hohe Reklamationsrisiko in diesem Bereich zurückzuführen ist.

Teilrisiken der RQZ gegliedert nach der Qualitätsabweichungsstruktur

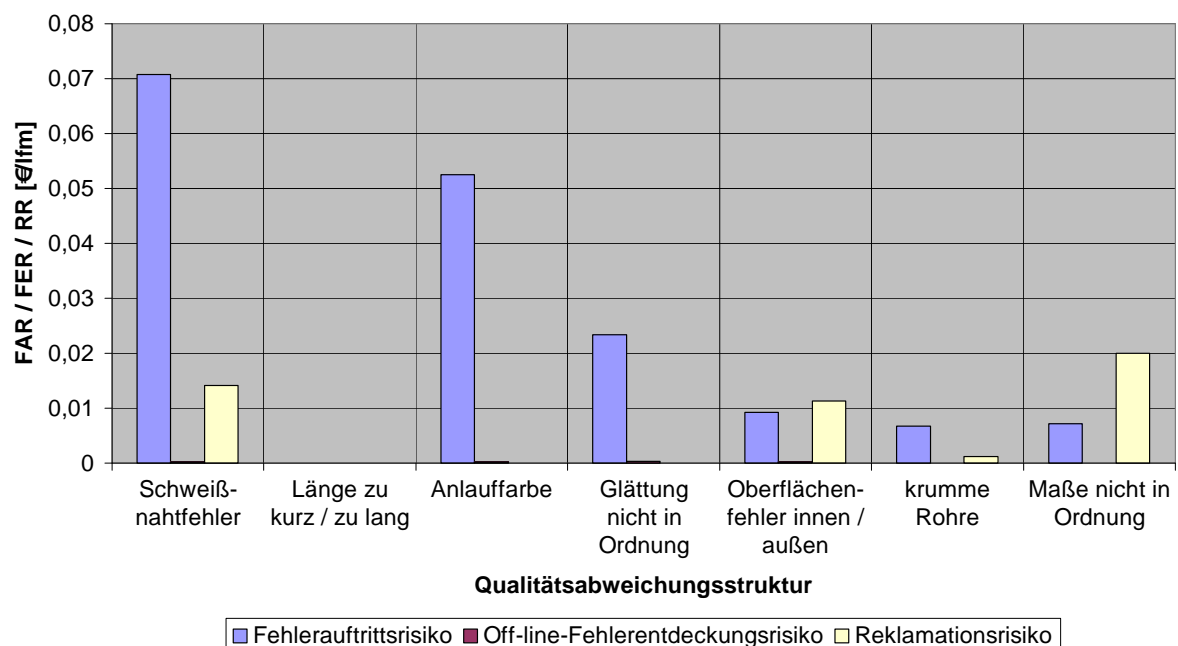


Abbildung 6.1.1-2: Gliederung von Fehlerauftritts-, Off-line-Fehlerentdeckungs- und Reklamationsrisiko nach Qualitätsabweichungsgruppen der Qualitätsabweichungsstruktur

Zur Betrachtung der aufgespannten Ebene aus „Qualität“ und „Risiko“ des mehrdimensionalen Datenwürfels, nach Abbildung 5.2-1, wird die **Risikoprioritätszahl** über definierten **Marktsegmenten** dargestellt. Die Strukturierung der Marktsegmente erfolgte in Anlehnung zu Kapitel 4.1.1.

Wie Abbildung 6.1.1-3 es wiedergibt, hat die Qualitätsabweichungsgruppe „Schweißnahtfehler“ über alle Marktsegmente gesehen zentrale Bedeutung. Dies bestätigt die bereits beschriebene Tendenz. Auf den nächsten Rängen in Bezug auf die Höhe der RQZ liegen die Fehlergruppen „Oberflächenfehler innen / außen“ und „Maße nicht in Ordnung“. Dies ist, wie bereits ausgeführt, auf die fehlenden Maßnahmen im Bereich der Qualitätssicherung zur Erweiterung der automatisierten Prüfung zurückzuführen. Absolut gesehen, ergibt sich die höchste Risikoquantifizierungszahl für das Marktsegment „Pressfittings“ und die Qualitätsabweichungsgruppe „Schweißnahtfehler“.

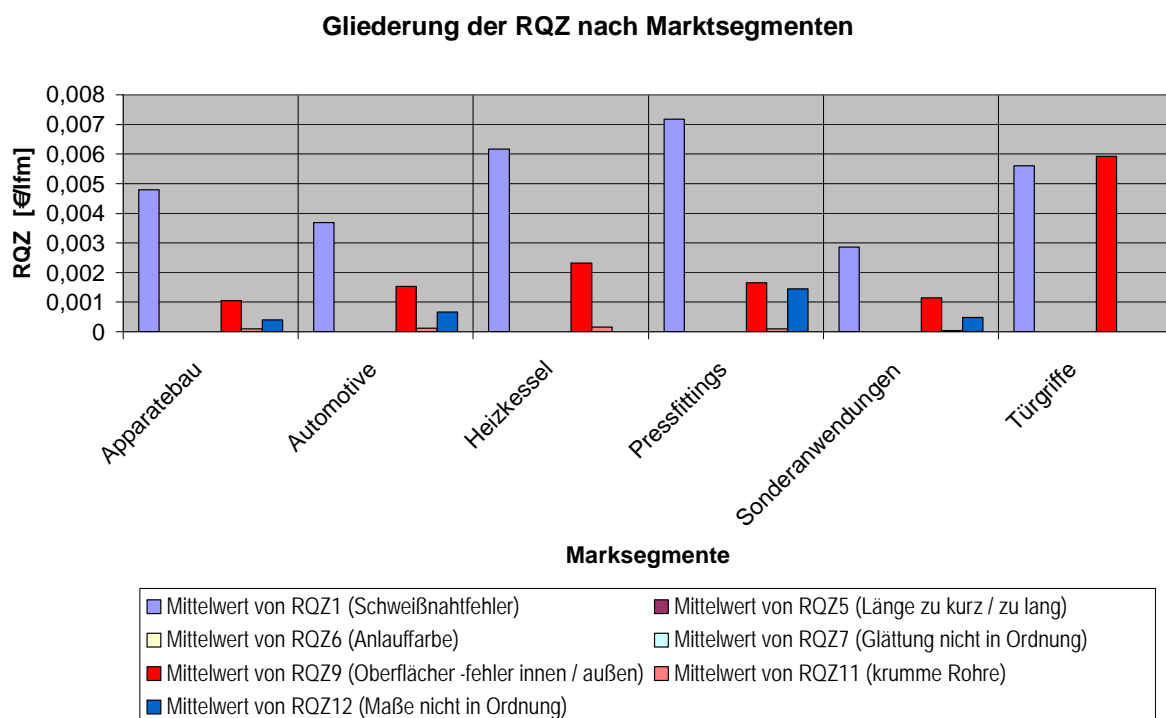


Abbildung 6.1.1-3: Gliederung der Risikoquantifizierungszahl nach Marktsegmenten

Dieses **Marktsegment** zeigt die Grenzen für den betrachteten Herstellungsprozess von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren auf, was sich auch in Bezug auf das in Abbildung 6.1.1-4 dargestellte **Fehlerauftrittsrisiko** widerspiegelt.

Die sich ergebende Zusammensetzung der Verteilung für das Fehlerauftrittsrisiko in Bezug auf Rohre, aus denen **Pressfittings für Sanitäranwendungen** hergestellt werden, lässt sich auf die Funktionsansprüche für die Weiterverarbeitung und für die Endanwendung ableiten. Das Rundrohr aus Edelstahl wird im Zuge der Herstellung eines Pressfittings hohen Umformgraden ausgesetzt, was eine gute Verformbarkeit des Werkstoffs voraussetzt. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, müssen bei Einsatz einer integrierten Wärmebehandlung sehr hohe Glühtemperaturen zum Einsatz kommen. Dies kann zu Prozessinstabilitäten in Bezug auf die Aufrechterhaltung der Schutzgasatmosphäre und Abkühlung des Glühgutes führen. Durch diesen Zusammenhang ist auch das hohe Fehlerauftrittsrisiko von **Anlauffarben** zu erklären.

Die Ausprägung der Schweißnahtwurzel ist für den Anwendungsfall eines Pressfittings funktionsrelevant, wie in Abbildung 4.1.1-4 dargestellt, da die Schweißnahtwurzel im Bereich einer Dichtfläche zu liegen kommt. Aus diesem Grund liegt die Tolerierung der zulässigen Wurzelüberhöhung für dieses Produkt mit 0,01mm weit über den Anforderungen der Produktnorm. Die angewendeten hohen Walzdrücke um eine „blechebene“ Einformung der Schweißnahtwurzel zu gewährleisten, beeinträchtigen die Prozessstabilität. Was sich in einem hohen Fehlerauftrittsrisiko der **Fehlergruppe „Glättung nicht in Ordnung“** niederschlägt. Durch die starke Beanspruchung der Schweißnaht bei der Umformung des Rohres zum Pressfitting werden besondere Ansprüche an die Ausprägung der Schweißnaht gestellt. Durch diese hohen Qualitätsanforderungen ist auch das große Fehlerauftrittsrisiko für **Schweißnahtfehler** zu erklären.

Gliederung Fehlerauftrittsrisiko nach Marktsegmenten

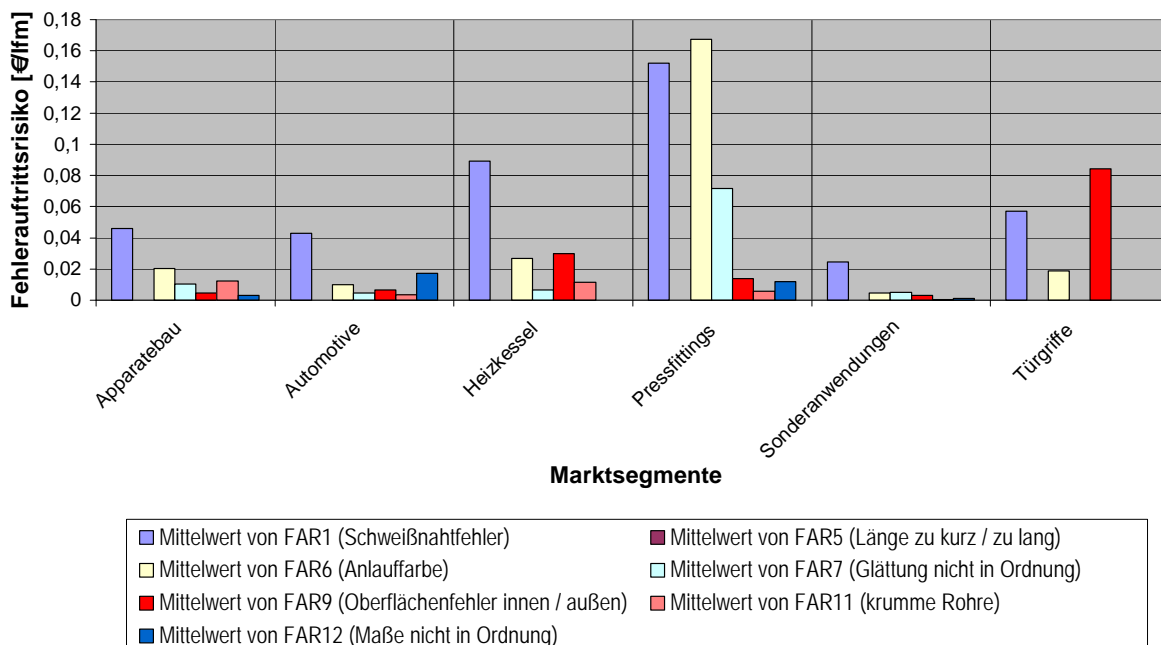


Abbildung 6.1.1-4: Gliederung von Fehlerauftritts-, Off-line-Fehlerentdeckungs- und Reklamationsrisiko nach Marktsegmenten

Betrachtet man das **Niveau des Fehlerauftrittsrisikos** in Bezug auf die typischen Herstellungskosten pro Laufmeter Edelstahlrohr, so liegt man hier klar im Prozentbereich, was die Notwendigkeit mit diesen Themen für die Optimierung des Herstellungsprozesses nur unterstreicht.

6.1.2 Schweißprozess am Spaltrohr

Für das kontinuierliche Schweißen von Edelstahlrohren können grundsätzlich unterschiedliche Schweißverfahren zum Einsatz kommen. Die Wahl des Schweißverfahrens bedeutet eine entscheidende Weichenstellung für die herstellbare Produktqualität, wie bereits in Kapitel 3.2.2 ausgeführt. Aus diesem Grund ist der Risikobestimmung für den Prozessschritt „Schweißen“ des betrachteten Rohrwerks zur Herstellung längsnahtgeschweißter Edelstahlrohre ein Überblick über die **technischen Zusammenhänge** vorangestellt. Der folgende Abschnitt 6.1.2.1 dient vor allem dazu, Verständnis für die verwendeten Begriffe und Optimierungskriterien im Zuge der Risikobetrachtung unter Kapitel 6.1.2.2 zu schaffen.

Die Notwendigkeit einer eingehenden Betrachtung des Prozessschritts „Schweißen“ leitet sich aus den Ergebnissen von Kapitel 6.1.1 ab. Davon ausgehend erfolgt eine gegliederte Risikobestimmung für die **Qualitätsabweichungsgruppe „Schweißnahtfehler“**. Der Abschnitt 6.1.2.2 wird durch die Beschreibung einer durchgeführten Optimierung des Schweißprozesses, unter Anwendung der Risikoanalyse, für die Fertigung von Rohren zur Herstellung von **Airbag-Zündern** abgeschlossen.

6.1.2.1 Technische Zusammenhänge

Um die Anwendbarkeit unterschiedlicher Schweißverfahren in Bezug auf die Produktqualität transparent darstellen zu können, werden die folgenden Verfahrensgruppen gegenübergestellt:

- **Schmelzschweißen**
 - o Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) mit konstantem Gleichstrom [35-39]
 - o Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) mit gepulstem Gleichstrom [1-6]
- **Strahlschweißen**
 - o Laserstrahlschweißen [7-17]
- **Pressschweißen**
 - o Hochfrequenzwiderstands-Pressschweißen (HF) [18-26]

Für die kontinuierliche Rohrherstellung sind vor allem die angeführten Schweißverfahren von Bedeutung. In Bezug auf die grundsätzliche Beschreibung der Schweißverfahren und der zugehörigen Verfahrensparameter sei auf die angegebenen Literatur verwiesen.

6.1.2.1.1 Einfluss Schweißverfahren – Nahtausprägungsform

Der Vergleich der **Nahtabmessungen** zeigt, dass die Nahtbreite sehr vom Schweißverfahren abhängig ist. Bei Betrachtung der Schweißnahtform entsprechend Abbildung 6.1.2.1.1-1, 6.1.2.1.1-2 und 6.1.2.1.1-3, die sich als Ergebnis der Anwendung der drei verschiedenen Schweißverfahren WIG-, Laserstrahl- und HF-Schweißen für die kontinuierliche Fertigung von Edelstahlrohren ergibt, kann deutlich der Unterschied in der Höhe der **Wärmeeinbringung** erkannt werden.

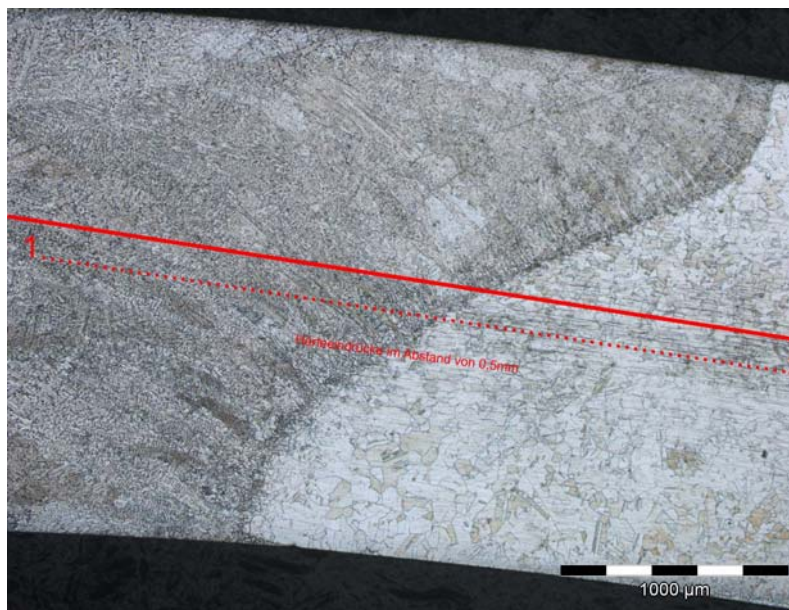


Abbildung 6.1.2.1.1-1: Schliffbild der Schweißnaht für ein WIG-geschweißtes Edelstahlrohr (Rohrdurchmesser 70mm / Wanddicke 2mm / 1.4541)

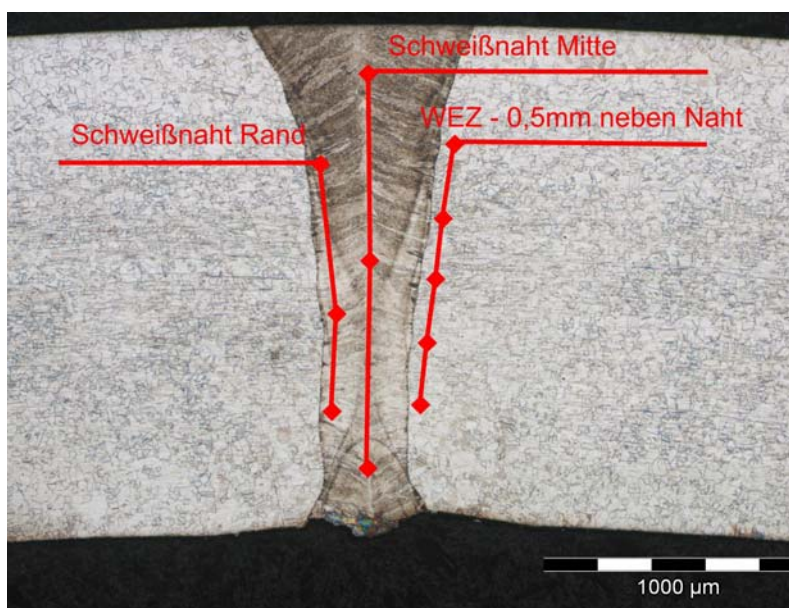


Abbildung 6.1.2.1.1-2: Schliffbild der Schweißnaht für ein Laser-geschweißtes Edelstahlrohr (Rohrdurchmesser 70mm / Wanddicke 2mm / 1.4541)

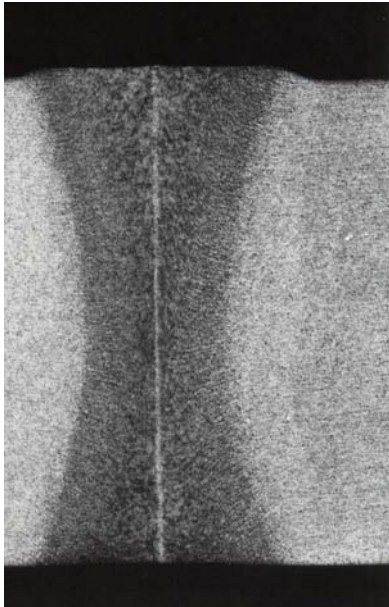


Abbildung 6.1.2.1.1-3: Schliffbild der Schweißnaht für ein HF-geschweißtes Edelstahlrohr [18]

Für das Beispiel eines Edelstahlrohres mit zwei Millimeter Wanddicke ergibt sich für den Fall des **Laserschweißens** eine relativ geradlinig verlaufende Naht mit einer Breite im Bereich zwischen 0,2 und 0,6 Millimeter. Gut erkennbar ist auch die Anwendung des Stichlochscheidens an der charakteristischen Erstarrungsart der Schweißnahtwurzel. Diese fügt sich nur sehr inhomogen in die Innenkontur des Rohres, zeigt eine ausgeprägte Übergangszone zum Grundwerkstoff und weist einen scharfen Grad entlang der Schweißnahtwurzel auf. Im Vergleich dazu ist die **WIG-Schweißnaht** wesentlich breiter und von der Form kelchförmiger ausgeprägt. Die Breite der Naht liegt an der Rohraußenoberfläche im Bereich 5 bis 6 Millimeter und an der Wurzel im Bereich 2 bis 2,5 Millimeter. Die Beeinflussung der Schweißnahtform für den Fall des WIG-Schweißens kann sehr effektiv über das verwendete Schutzgas und dessen Zusammensetzung bestimmt werden [36]. In diesem Fall wurde als Schutzgas ein Argon-Wasserstoffgemisch mit einem Wasserstoffanteil von rund 6% verwendet. Der Übergang der Schweißnahtwurzel zum Grundwerkstoff ist auf Grund einer Innennahtglättbehandlung sehr homogen gestaltet.

Das Breite-Tiefe-Verhältnis des Nahtquerschnitts hängt in hohem Maße von der Wärmeleistungsverteilung, und damit dem radialen Temperaturfeld an der Schweißstelle ab. Die **Energiedichte** des Laserstrahlschweißens liegt deutlich über jener des WIG-Schweißens [7], sodass Verfahren, die mit höherer Energiedichte arbeiten, eine geringere Brutto-Schweißleistung bzw. Streckenenergie aufbringen müssen, um das Aufschmelzen des Werkstoffs sicherstellen zu können [3].

In Abbildung 6.1.2.1.1-4 wird die **Streckenenergie** für die drei betrachteten Schweißverfahren als Funktion der Wanddicke dargestellt. Diese Darstellung wurde aus gesammelten Produktionsparametern in der Rohrherstellung mittels Regressionsanalyse ermittelt und weist eine hohe Übereinstimmung auf.

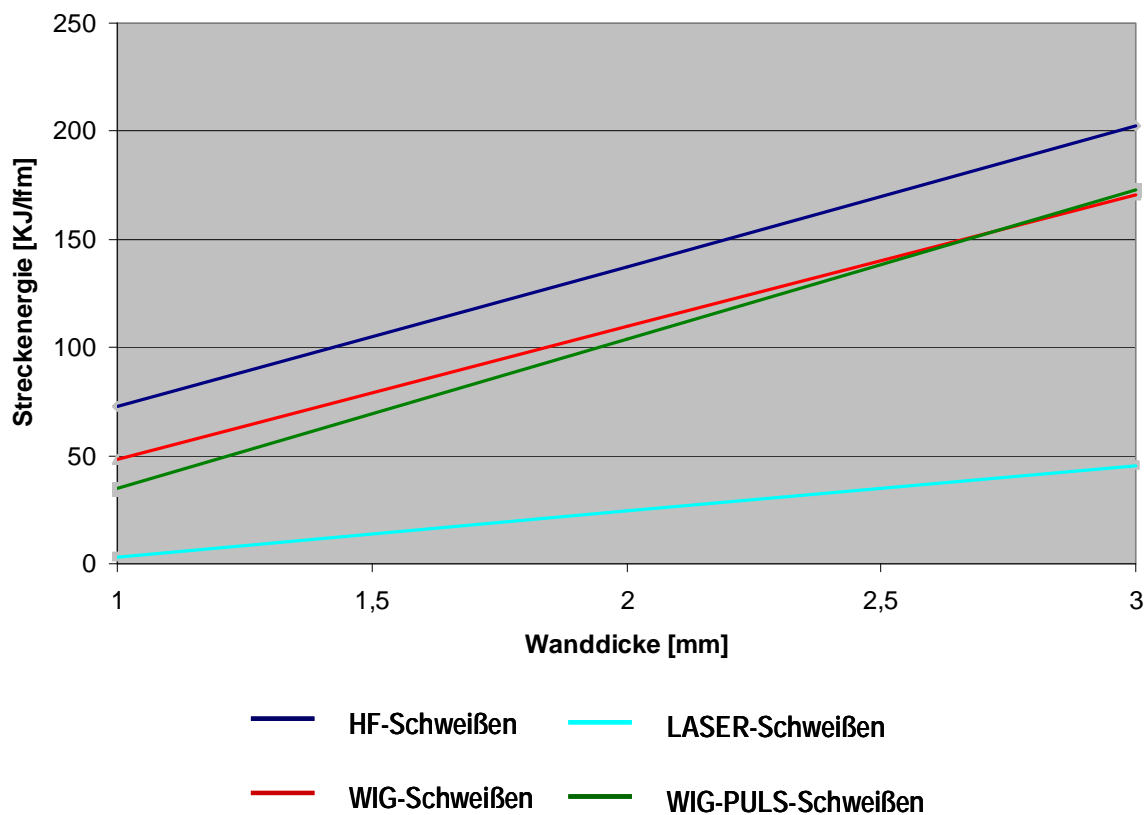


Abbildung 6.1.2.1.1-4: Streckenergie als Funktion der Rohrwanddicke für unterschiedliche Schweißverfahren

Für alle Schweißverfahren gilt grundsätzlich, dass mit steigendem Schmelzbadvolumen, also auch bei höherer Blechdicke, die benötigte Streckenergie ansteigt.

Weiters bestätigt Abbildung 6.1.2.1.1-4 einerseits die These, dass Verfahren mit hoher Energiedichte, wie das Laserstrahlschweißen, eine geringe Streckenergie benötigen, um die notwendigen Temperaturen im Bereich der Schweißzone aufbringen zu können. Die Anwendung des WIG-Schweißens, sowohl mit Gleichstrom als auch mit gepulstem Strom, zeichnet sich durch eine deutlich höhere Energieeinbringung im Vergleich zum Laserschweißen aus. Hinsichtlich der benötigten Streckenergie bietet das Impulsschweißen in diesem Zusammenhang keinen messbaren Vorteil gegenüber dem WIG-Schweißen mit Gleichstrom. Entsprechend der Größe des Nahtquerschnitts liegt das HF-Schweißen von Edelstahlrohren hinsichtlich der Energieeinbringung deutlich über den beiden anderen Verfahren. Somit kann für das Längsnaht-Schweißen von Edelstahlrohren sehr gut der Zusammenhang zwischen Schweißenergie und Nahtausprägung gefunden werden.

Legt man nun die Betrachtung der Streckenergie für die einzelnen Schweißverfahren um auf eine **Wirkungsgraddarstellung** [3], so ergibt sich für den Wärmeübertragungswirkungsgrad entsprechend Gleichung 6.1.2.1.1-1 für das WIG-Schweißen ein um 80% kleinerer Wert als für das Laserschweißen.

$$\eta_w := \frac{q}{q_{\text{brutto}}}$$

[Gl. 6.1.2.1.1-1]

Die Brutto-Streckenenergie q_{brutto} oder Brutto-Schweißleistung beschreiben, die dem Schweißprozess insgesamt zugeführten Energie. Die muss der von der Schweißquelle zur Verfügung gestellten Energie entsprechen. Die effektiv in das Werkstück eingebrachte oder übertragene Energie bzw. Leistung wird durch die Netto-Streckenenergie q oder Netto-Leistung abgebildet. Durch den **Wärmeübertragungswirkungsgrad** η_w [3] werden somit Wärmeverluste erfasst, die sich aus Wärmestreuung in die Umgebung durch Konvektion oder Strahlung, durch Spritzerbildung, Verdampfungsvorgänge und Erwärmung der Elektrode ergeben. Für den Fall des Laserschweißens spricht man in analoger Weise vom **Einkopplungswirkungsgrad** η_{LASER} und im Falle des HF-Schweißens vom **Verfahrenswirkungsgrad** η_{HF} . Nach Gleichung 6.1.2.1.1-2 und 6.1.2.1.1-3 ergibt sich eine Staffelung der Verfahrenswirkungsgrade mit dem Referenzprozess des Laserstrahlschweißens. Dieser Zusammenhang basiert auf einem gut abgestimmten Laserschweißprozess, der in einem Verfahrenswirkungsgradbereich zwischen 0,8 und 0,9 arbeitet.

Der Einsatz von Induktionserwärmung für den Schweißprozess ist zwangsläufig mit großen Energieverlusten behaftet, sodass Verfahrenswirkungsgrade kleiner 0,3 durchaus möglich und realistisch sind [20].

Der Wärmeübertragungswirkungsgrad beim WIG-Schweißen η_{WIG} liegt im Bereich zwischen 0,2 und 0,8, was bedingt wird durch den Energieverlust in Folge der Erhitzung der Elektrode und der Gasdüse, sodass der hier abgeschätzte Wert sehr stark im unteren Drittel zu liegen kommt [3].

$$\eta_{\text{WIG}} := \frac{q_{\text{bruttoLASER}}}{q_{\text{bruttoWIG}}} \cdot \eta_{\text{WLASER}} \quad \text{mit} \quad \frac{q_{\text{bruttoLASER}}}{q_{\text{bruttoWIG}}} = 0.239$$

[Gl. 6.1.2.1.1-2]

$$\eta_{\text{HF}} := \frac{q_{\text{bruttoLASER}}}{q_{\text{bruttoHF}}} \cdot \eta_{\text{WLASER}} \quad \text{mit} \quad \frac{q_{\text{bruttoLASER}}}{q_{\text{bruttoHF}}} = 0.196$$

[Gl. 6.1.2.1.1-3]

Neben dieser klassischen Betrachtung zum Vergleich der Schweißverfahren ergeben sich auch noch weitere Unterschiede, die sich durch Besonderheiten der Verfahren bedingen, welche nicht rein aus energetischer Perspektive analysiert werden können. Als solche Beispiele sind typischerweise eine schlechte Wurzelausträgung bei Laserschweißnähten oder eine Bildung von Stauchwülsten beim Hochfrequenz-Preßschweißen angeführt. Diese Betrachtungsweise soll für den Einfluss des Schweißverfahrens im folgenden Abschnitt analysiert werden.

6.1.2.1.2 Einfluss Schweißverfahren – Qualitätsmerkmale Schweißnaht

Aus dem Normenstrukturbaum, nach Abbildung 4.1.1-3, geht hervor, dass die Kriterien „**Oberflächenqualität im Schweißnahtbereich**“ und „**Wurzelüberhöhung**“ explizit der Schweißnahtausführung zugeordnet werden können. Diesen Normforderungen an die Ausführung der Schweißnaht werden die Möglichkeiten der Schweißverfahren gegenübergestellt.

Wie unter Kapitel 3.1.2 ausgeführt werden HF-geschweißte Rohre meist nach der Produktnorm DIN EN 10296-2 [27] gefertigt. Wobei die Wahl des Schweißverfahrens dabei grundsätzlich offen gelassen wird. Ebenso gibt es laut DIN 17455 [28] keine Vorgabe für die Wahl des Schweißverfahrens, wobei explizit Schmelz- und Preßschweißen als zulässig erwähnt wird. Nach DIN 17457 [29] wird auf Grund der hohen Qualitätsanforderung schon in der Norm selbst die Anwendung von Schmelzschweißverfahren vorgeschrieben. In Bezug auf die **Nahtüberhöhung**, sowohl im Rohrinernen an der Schweißnahtwurzel als auch an der Rohraußenoberfläche, soll Tabelle 6.1.2.1.2-1 eine Übersicht der zulässigen Toleranzen, gemäß den beschriebenen Normen geben.

DIN EN 10296-2		DIN 17457		DIN 17455	
qualitative Beschreibung	zulässige Schweißnahtüberhöhung	qualitative Beschreibung	zulässige Schweißnahtüberhöhung	qualitative Beschreibung	zulässige Schweißnahtüberhöhung
A-innere und äußere Schweißnahtüberhöhung nicht entfernt	0,2*WD+0,5	Nachsetzzeichen g (Glättung oder Entfernung der inneren Schweißnahtüberhöhung)	0,25+0,03*WD	keine Einschränkung für den Schweißnahtbereich, solange die Wanddickentoleranz eingehalten wird	
B-äußere Schweißnahtüberhöhung entfernt / innere Schweißnahtüberhöhung nicht entfernt	0,6*WD+0,3				
C-äußere und innere Schweißnahtüberhöhung entfernt	0,15				

Tabelle 6.1.2.1.2-1: Zulässige Schweißnahtüberhöhung nach DIN EN 10296-2, DIN 17457 und DIN 17455

Die Betrachtung der zulässigen Schweißnahtüberhöhung kann nicht isoliert von der Rohrwanddicke außerhalb der Fügezone erfolgen, da es im Bereich der Schweißnaht zu einer Überlagerung der zugehörigen Toleranzfelder kommt. In Abbildung 6.1.2.1.2-1 sind die zulässige **Schweißnahtüberhöhung** und **Wanddickentoleranzen** entsprechend der beschriebenen Normen absolut in Bezug auf die Rohrwanddicke dargestellt. Nach DIN 17457 und DIN 17455 werden für die Nennwanddicke Toleranzklassen T3 und T4 vorgeschrieben. Dies bedeutet nach Abbildung 3.1.2-2 eine maximale Wanddickentoleranz von +/- 0,2 Millimeter für den Fall T3 und von +/- 0,15 Millimeter für den Fall T4. Vergleicht man nun

die maximal zulässige Wanddickenabweichung aus der DIN EN 10296-2 von ± 2 Millimeter, so zeigt sich, dass die nötige Genauigkeit zur Einhaltung der Wanddickentoleranz gemäß DIN 17455 und DIN 17457 für HF-geschweißte Rohre nur sehr schwierig oder nicht möglich ist. Durch den sich bildenden inneren und äußeren Schweißwulst beim **HF-Schweißen** wäre keines der Toleranzkriterien zu erreichen, sodass ein Schleif- und Schabeprozess ohnehin als integrierter Bestandteil der Rohrherstellung mit HF-Schweißanlagen gesehen werden muss.

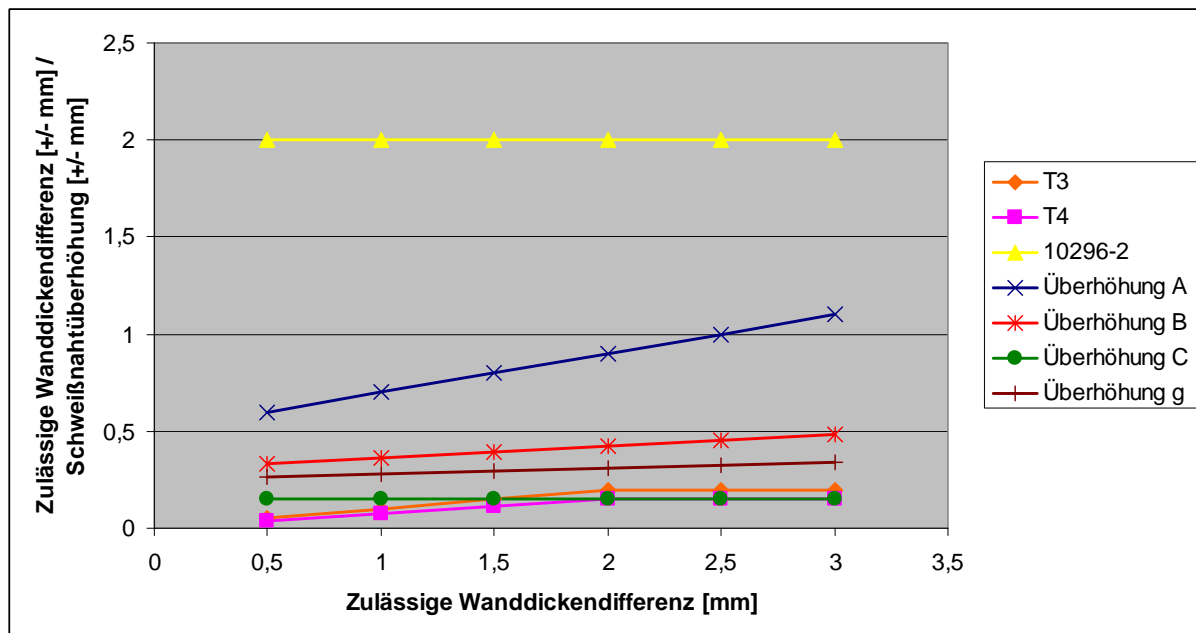


Abbildung 6.1.2.1.2-1: Toleranz Grenzwalldicke und zulässige Schweißnahtüberhöhung nach DIN 17455, DIN 17457 und DIN EN 10296-2

Für die Fertigung von Edelstahlrohren nach DIN 17455 oder DIN 17457 eignen sich **Schmelzschweißverfahren** grundsätzlich besser, da es hier zu keiner Schweißnahtüberhöhung an der Rohraußenoberfläche kommt. Weiters fügt sich die Schweißnaht von Schmelzschweißverfahren weitaus homogener in den Rohrquerschnitt ein, wodurch die Einhaltung der Wanddickentoleranz nach den Toleranzklassen T3 und T4 nach Abbildung 6.1.2.1.2-1 möglich ist. Vergleicht man den Absolutwert der zulässigen Wanddickentoleranz nach DIN EN 10296-2 mit jener nach DIN 17457 Toleranzklasse T4 im Bereich zwischen 0,5 und 3 Millimeter Wanddicke, so ergibt sich eine maximale Differenz von 92,5%. Dieser Vergleich zeigt, dass man im Bereich des Konstruktionsrohres von völlig anderen Ausgangsprämissen ausgeht, die eine isolierte Betrachtung der Schweißnahtüberhöhung nicht zu lassen.

Abbildungen 6.1.2.1.2-2 und Abbildung 6.1.2.1.2-3 zeigen Beispiele für die mögliche Wanddickentoleranz und Schweißnahtüberhöhung, die sich für ein **WIG- und Laser-geschweißtes Edelstahlrohr** ohne weitere Nachbehandlung bieten. Aus Abbildung 6.1.2.1.2-2 ist zu erkennen, dass die Schweißnahtwurzel der WIG-Naht eine Wurzelüberhöhung von 0,14 Millimeter auf die Ausgangswanddicke von 0,91 Millimeter aufweist. Somit sind die Toleranzanforderungen nach DIN 17457 Toleranzklasse T3 erfüllt. Die Lasernaht in Abbildung 6.1.2.1.2-2 zeigt eine maximale Nahtüberhöhung von 0,16 Millimeter in Bezug auf die Ausgangswanddicke von 1,8 Millimeter, sodass auch hier die Anforderungen nach DIN 17457 T3 noch eingehalten werden können. Praktisch ist es üblich mit Laser geschweißte Edelstahlrohre bis zu Grenzwalldicken von 1,5 Millimeter nach der Toleranzklasse T3 zu

fertigen. Bei kleineren Wanddicken können Schweißnahtüberhöhungen kleiner 0,12 Millimeter nicht mehr eingehalten werden, wodurch für diesen Abmessungsbereich verstärkt WIG-Schweißen eingesetzt wird.

Der Vorteil des Längsnaht-Schweißens von Edelstahlrohren unter Verwendung des WIG-Verfahrens liegt somit in der Ausbildung eines sehr geringen Wurzelüberhangs und der sehr homogenen Wurzelprägung. Dies kommt vor allem bei der Fertigung von Rohrdurchmessern kleiner 15 Millimeter zu tragen, da hier eine In-Line-Nachbehandlung der Schweißnaht durch Glätten oder Schaben nicht möglich ist. Auch für Rohrdurchmesser größer 15 Millimeter bietet sich ein Vorteil aus dem WIG- gegenüber dem Laser-Schweißen in Bezug auf die erzeugbare Innenkontur des Rohres, was die Anwendbarkeit von Verfahren zur Glättung der Schweißnahtwurzel, welche durch das Nachsetzzeichen g nach DIN17457 gekennzeichnet sind, angeht.

Vergleicht man die Anwendbarkeit von Edelstahlrohren, deren Schweißnahtwurzel nicht nachgearbeitet wurde, für verschiedene Umformprozesse des Anwenders, wie beispielsweise das Einrollen der Rohrenden in die Lochplatte eines Wärmetauschers oder das Aufweiten mittels eines rotierenden Werkzeugs, so zeigt auch hier die WIG-Schweißnaht klare Vorteile, da die Wanddickenänderung auf Grund der Wurzelüberhöhung auf die größere Breite der Schweißnaht verteilt ist. Eine schabende oder schlagartige Belastung eines rotierenden Werkzeugs wird somit vermieden und die Werkzeugstandzeit verlängert.

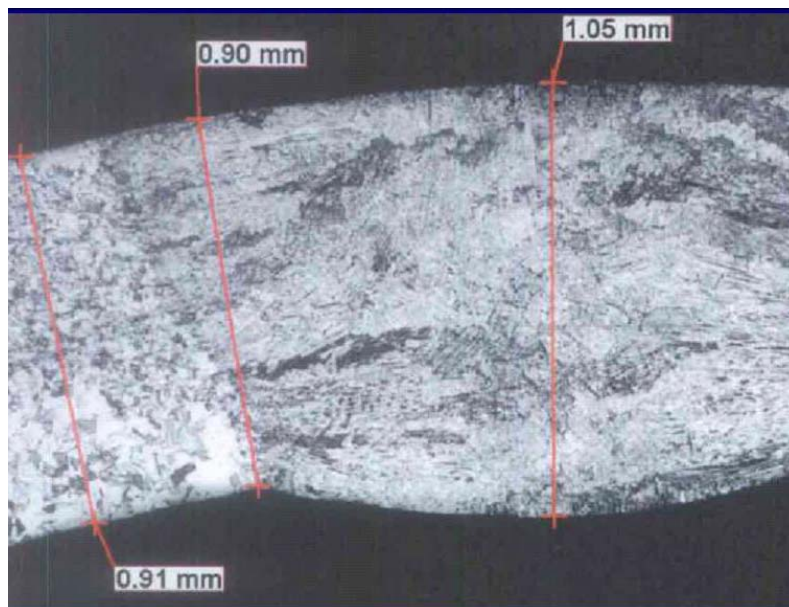


Abbildung 6.1.2.1.2-2: Wurzelüberhöhung der Schweißnaht für ein WIG-geschweißtes Edelstahlrohr (Rohrdurchmesser 10mm / Wanddicke 1mm / 1.4306)

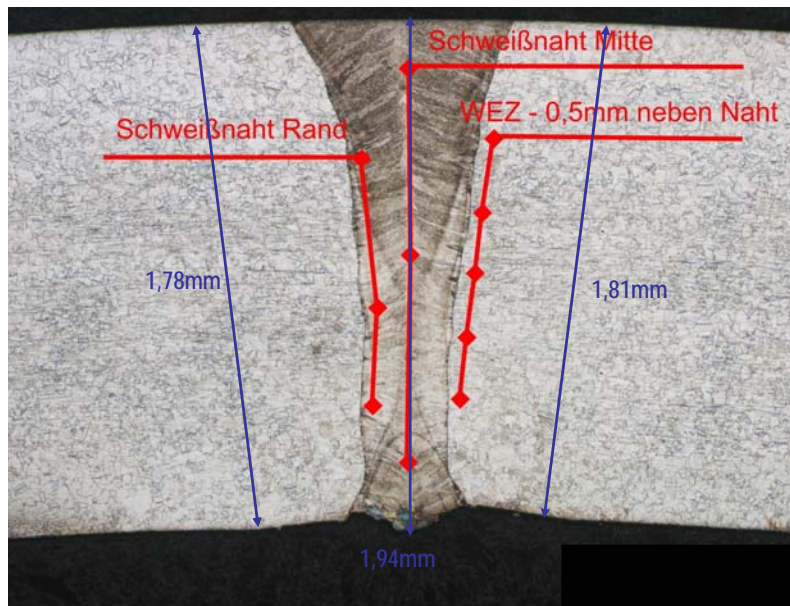


Abbildung 6.1.2.1.2-3: Wurzelüberhöhung der Schweißnaht für ein Laser-geschweißtes Edelstahlrohr (Rohrdurchmesser 70mm / Wanddicke 2mm / 1.4539)

6.1.2.1.3 Einfluss Schweißverfahren – Qualitätsmerkmale Edelstahlrohr

Eine die Anforderungen der Produktnorm an die **Korrosionsbeständigkeit** von Edelstahlrohren kann als Beispiel für ein nicht unmittelbar mit nur einem Fertigungsschritt verknüpfbares Qualitätsmerkmal gesehen werden. Entsprechend dem Normenstrukturbaum, nach Abbildung 4.1.1-3, ist die Korrosionsbeständigkeit dem Punkt D „mechanischen und technologischen Eigenschaften“ zuzuordnen. Auf Basis dieses Zusammenhangs ist es nun sehr von Interesse, welchen Einfluss die Schweißnaht auf das Korrosionsverhalten des Edelstahlrohres ausübt. Den Anforderungen aus der Produktnorm in Bezug auf dieses Kriterium werden die Einflüsse der **unterschiedlichen Schweißverfahren** gegenübergestellt. Die Normen DIN 17455 [27] und DIN 17457 [28] reduzieren den Begriff Korrosionsbeständigkeit auf die Beständigkeit des Edelstahlrohres gegenüber Interkristalliner Korrosion (IK).

Der Passivzustand, welcher die Korrosionsbeständigkeit von Edelstählen sicherstellt, wird durch eine **lokale Chrom-Verarmung** eingeschränkt. Man spricht von einer Sensibilisierung des Werkstoffs, welche die Bildung von korngrenzenahen Chromkarbiden und die damit verbundene Chromverarmung im Korninnern beschreibt. Der dadurch mögliche lokale Korrosionsangriff in Bereichen mit geringem Chromgehalt kann zu den Korrosionsformen „Interkristalline Korrosion“ oder „Pitting-Korrosion“ führen. Eine Sensibilisierung des Werkstoffs kann auf die thermische Behandlung im Zuge des Herstellungsprozesses zurückgeführt werden [30].

Entsprechend DIN 17455 und DIN 17457 wird bezüglich Bestimmung der Korrosionsbeständigkeit in Bezug auf Interkristalline Korrosion auf die Norm DIN EN ISO 3651-2 [31] verwiesen und die entsprechende Grenztemperatur für die verwendbaren Werkstoffe angegeben. Diese **Grenztemperatur** wird auch CPT (Critical Pitting Corrosion Temperature) genannt und in Abhängigkeit der Legierungszusammensetzung des Werkstoffs angegeben, wobei die **Zusammensetzung** über PRE (Pitting Resistance Equivalent) genannten Equivalent erfasst wird. In Abbildung 6.1.2.1.3-1 ist die Grenztemperatur über dem

PRE-Equivalent für Grundmaterial und Schweißnaht dargestellt. Wobei erkennbar ist, dass die Anwendung des Schweißprozesses eine Reduktion der IK-Beständigkeit zur Folge hat, welche mit zunehmendem Legierungsgehalt deutlicher wird.

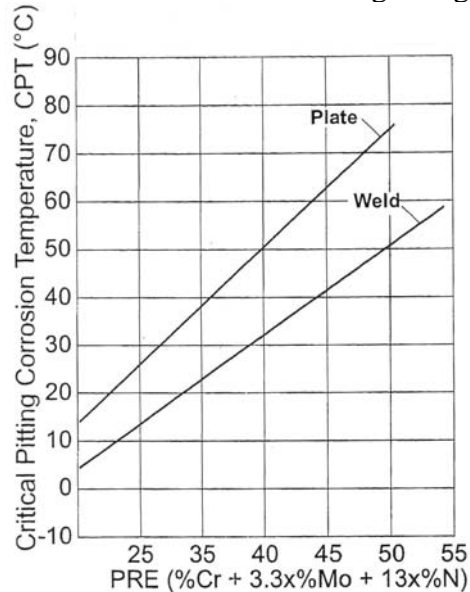


Abbildung 6.1.2.1.3-1: Grenztemperatur der IK-Beständigkeit (CPT) als Funktion des Legierungselementgehalts (PRE) [32]

Die **lokale Wärmeinbringung** im Zuge des Schweißprozesses stellt dabei den zentralen Einflussfaktor aus dem Fertigungsprozess heraus dar. Durch eine sehr konzentrierte Wärmeinbringung ergeben sich höhere Abkühlgeschwindigkeiten, sodass eine lokale Entmischung des Chroms unterdrückt wird. Entsprechend Abbildung 6.1.2.1.3-1 müsste somit die Laser-Schweißnaht die höchste Beständigkeit gegenüber interkristalliner Korrosion aufweisen, gefolgt von WIG- und HF-geschweißten Rohren entsprechend der höheren Streckenenergie.

Es lässt sich nachweisen, dass die Beständigkeit gegenüber Interkristalliner Korrosion von Längsnaht-geschweißten Edelstahlrohren mittels Laserstrahlschweißen über jener von WIG-geschweißten Rohren liegt. Bei Anwendung des Hochfrequenz-Preßschweißens wird zwar eine höhere Schweißleistung angewendet als bei den beiden anderen beschriebenen Schweißverfahren, jedoch liegt hier die Korrosionsbeständigkeit auf ähnlichem Niveau wie im Falle der wärmebehandelten WIG-Schweißnaht, was auf das Ausbringen des thermisch beeinflussten Materials über die Bildung des inneren und äußeren Schweißwulstes zurückzuführen ist [33].

Historisch gesehen wurde, die durch Glühen wärmebehandelte WIG-Schweißnaht eines Edelstahlrohres, für lange Zeit als Referenz in Bezug auf die IK-Beständigkeit angesehen. Jedoch können die entsprechend DIN 17457 vorgeschriebenen Werte der Grenztemperatur, auch durch die Anwendung des Laserschweißens ohne nachträgliche Glühbehandlung erreicht werden. Der **Vorteil des Laserstrahlschweißens** in Bezug auf die Korrosionsbeständigkeit ist auf die geringe benötigte Streckenenergie infolge hoher Schweißgeschwindigkeiten und Energiedichte zurückzuführen [34].

6.1.2.2 Risikobetrachtung Schweißprozess

Führt man die Betrachtung von Kapitel 6.1.1 in Bezug auf die Qualitätsmerkmalsgruppe „Schweißnahtfehler“ weiter, so erscheint die Auswertung der feineren Untergliederung der Qualitätsmerkmalsstruktur in Bezug auf das Fehlerauftrittsrisiko sinnvoll. Nach Abbildung 6.1.1-2 haben Schweißnahtfehler die größte Bedeutung für den Herstellungsprozess im betrachteten Rohrwerk. Entsprechend Anhang 7.1 untergliedert sich die **Fehlergruppe „Schweißnahtfehler“** in folgende Fehler:

- **Poren** (vgl. Abbildung 7.2-5)
- **Spannungsrisse** (vgl. Abbildung 7.2-6)
- **Schweißaussetzer** (vgl. Abbildung 7.2-3)
- **Nicht durchgeschweißt** (vgl. Abbildung 7.2-1)
- **Kantenversatz** (vgl. Abbildung 7.2-4)
- **Danebengeschweißt** (vgl. Abbildung 7.2-5)
- **Einbrand** (vgl. Abbildung 7.2-2)

In Abbildung 6.1.2.2-1 ist die Auswertung des **Fehlerauftrittsrisikos** über den auftretenden Schweißnahtfehlern, nach obiger Gruppierung, dargestellt.

Die wesentlichste Qualitätsabweichung für die Fehlergruppe „Schweißnahtfehler“ stellt der **Schweißaussetzer** dar. Diese Abweichung kommt in der Regel durch einen kurzen Ausfall des WIG-Lichtbogens zustande. Es ergibt sich somit eine undichte Stelle in der Längsnaht des Edelstahlrohres, die im makroskopischen Bereich anzusiedeln ist. Die Ursachen für das Abreißen des Lichtbogens können vielfältig sein, und reichen von verschlissener Elektrodenspitze bis hin zu überhöhtem Schweißstrom.

Die **Qualitätsabweichung „Nicht durchgeschweißt“** folgt an zweiter Stelle bezüglich der Höhe des Fehlerauftrittsrisikos. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da sich die beiden Fehlerbilder ergänzen. Eine zu geringe Durchschweißung ist in der Regel auf eine zu geringe Wärmeeinbringung im Zuge des Schweißprozesses zurückzuführen. Eine zu hohe Wärmeeinbringung führt jedoch zu einem großen Schweißbadvolumen, was zum Durchfallen des Schmelzbades führen kann und somit Schweißaussetzer erzeugt. Damit begrenzen diese beiden Qualitätsabweichungen das **Prozessfenster** in dem man sich zu bewegen hat.

Im Vergleich zu den Kategorien „Schweißaussetzer“ und „Nicht durchgeschweißt“ liegen alle anderen Fehler bei sehr geringem Fehlerauftrittsrisiko.



Abbildung 6.1.2.2-1: Fehlerauftrittsrisiko gegliedert nach Qualitätsabweichungen der Qualitätsabweichungsgruppe „Schweißnahtfehler“

Auf Grund des beschriebenen Zusammenhangs für die Wärmeeinbringung im Zuge des Schweißprozesses und der Stabilität des Schmelzbades, sollte eine **Abhängigkeit** zwischen eingebrachter **Streckenenergie** und dem Fehlerauftrittsrisiko von **Schweißaussetzern** bestehen.

Mittels der gesammelten und mit der mehrdimensionalen Risikobetrachtung verknüpften Prozessdaten über Schweißparameter, Produktionsgeschwindigkeit und Rohrwanddicke für unterschiedliche Rohrdimensionen wurde eine multiple Regression [87] durchgeführt.

Zur Berechnung der Brutto-Streckenenergie q_{brutto} aus den Schweißparametern Schweißstrom I , Schweißspannung U und Produktionsgeschwindigkeit v wurde Gleichung 6.1.2.2-1 verwendet [3].

$$q_{\text{brutto}} [\text{KJ/lfm}] = (I [\text{A}] \times U [\text{V}] \times 10^3 \times 60) / v [\text{m/min}] \quad [\text{Gl. 6.1.2.2-1}]$$

Als Ergebnis der multiplen Regression ergibt sich ein Zusammenhang zwischen Brutto-Streckenenergie q_{brutto} , Rohrwanddicke t und Schweißgeschwindigkeit v nach Gleichung 6.1.2.2-2 über alle betrachteten Rohrfertigungslinien. Gleichung 6.1.2.2-2 stellt diesen Zusammenhang dar.

$$q_{\text{brutto}} [\text{KJ/lfm}] = 61,65 \times t [\text{mm}] + 0,0082 \times v [\text{m/min}] - 13,5 \quad [\text{Gl. 6.1.2.2-2}]$$

Wie aus Gleichung 6.1.2.2-2 erkennbar ist, ergibt sich kein entscheidender Einfluss durch die Produktionsgeschwindigkeit auf die Streckenenergie. Der Haupteinfluss in diesem Zusammenhang ist in der Wanddicke zusehen. Dieser Eindruck lässt sich durch einen F-Test für lineare und multiple Regression statistisch bestätigen [87]. Auf Grund dessen kann im Folgenden der Einfluss der Produktionsgeschwindigkeit zur Berechnung der Streckenenergie

vernachlässigt werden. Gleichung 6.1.2.2-3 beschreibt das Ergebnis der linearen Regression zwischen Brutto-Streckenenergie und Wanddicke.

$$q_{\text{brutto}} [\text{KJ/lfm}] = 61,647 \times t [\text{mm}] - 13,457 \quad [\text{Gl. 6.1.2.2-3}]$$

Mit steigender Wanddicke nimmt also die benötigte Streckenenergie zum Verbinden der Bandkanten, wie in Abbildung 6.1.2.1.1-4 dargestellt, linear zu.

Aus diesem Zusammenhang lässt sich folgern, dass das Fehlerauftrittsrisiko für die Qualitätsabweichung „Schweißaussetzer“ **proportional zur Rohrwanddicke** sein müsste.

Ein Nachweis über alle hergestellten Produkte war für das betrachtete Rohrwerk jedoch nicht eindeutig möglich. Der Grund ist in der Heterogenität der gefertigten Edelstahlrohrarten zu sehen. Sowohl Ausführungsart als auch eingesetzter Werkstoff wirken hier als verzerrende Einflussgrößen. Deshalb wurden einzelnen Marktsegmente, in Analogie zu Abbildung 4.1.1-1, getrennt voneinander betrachtet. Als Beispiele sind im Folgenden die Auswertungen für die Marktsegmente „Automotive“ und „Pressfittings“ dargestellt.

Sowohl in Abbildung 6.1.2.2-2 und in Abbildung 6.1.2.2-3 ist der eindeutige Zusammenhang zwischen Höhe des Fehlerauftrittsrisikos und Wanddicke erkennbar. Durch diese Gruppierung konnten verfälschende Einflüsse somit ausgeschlossen werden. In der Regel werden Produkte für die Automobilindustrie einheitlich aus dem Werkstoff 1.4301 und für den Bereich Pressfittings nach DVGW aus dem Werkstoff 1.4404 gefertigt. Auch die Ausführungsarten ergeben ein in sich geschlossenes Bild für die betrachteten Marktsegmente.

Ergänzend lässt sich aus Abbildung 6.1.2.2-4 bestätigen, dass je höher die benötigte Schweißenergie desto größer auch das Risiko für das Auftreten von Schweißaussetzern. Somit lässt sich der vermutete Zusammenhang zwischen eingebrachter Wärmemenge und dem Fehlerauftrittsrisiko bestätigen

Fehlerauftrittsrisiko für Qualitätsabweichung Schweißaussetzer gegliedert nach Wanddicke für Marktsegment Automotive

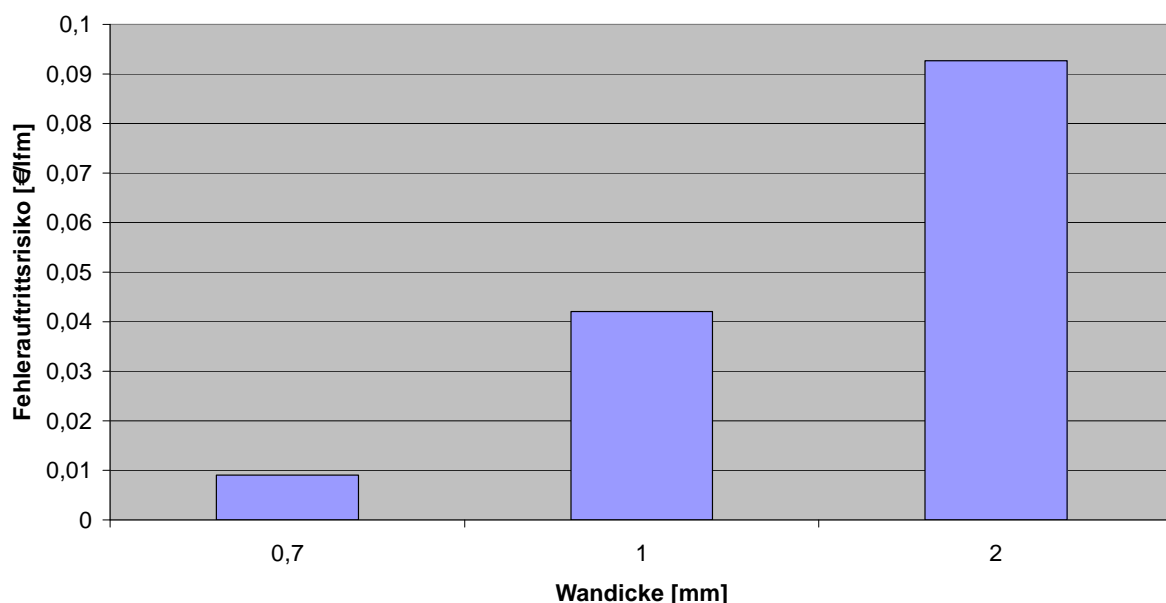


Abbildung 6.1.2.2-2: Fehlerauftrittsrisiko der Qualitätsabweichung „Schweißaussetzer“ gegliedert nach der Wanddicke für das Marktsegment „Automotive“

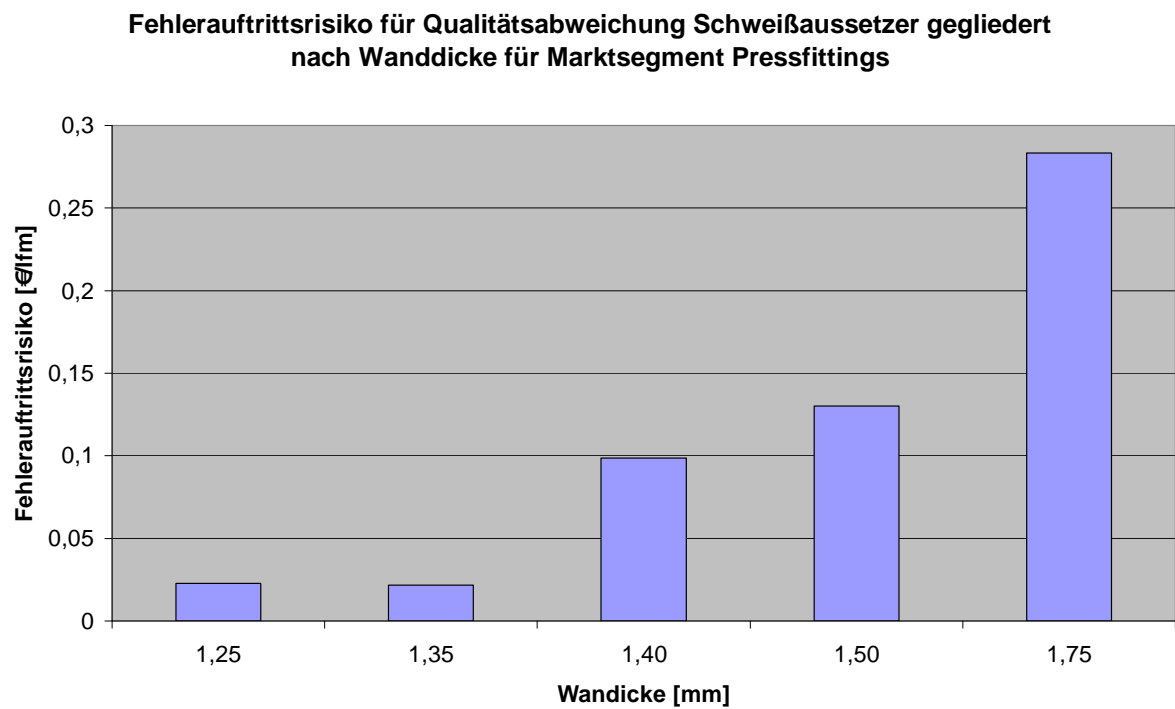


Abbildung 6.1.2.2-3: Fehlerauftrittsrisiko der Qualitätsabweichung „Schweißaussetzer“ gegliedert nach der Wanddicke für das Marktsegment „Pressfittings“

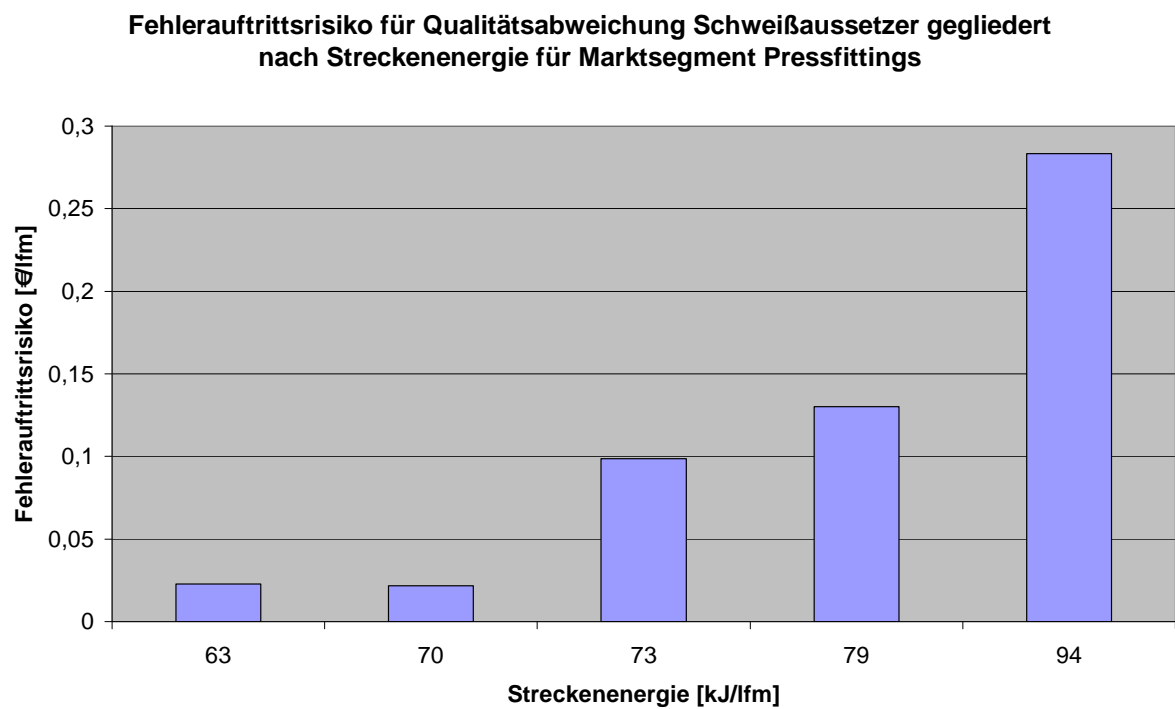


Abbildung 6.1.2.2-4: Fehlerauftrittsrisiko der Qualitätsabweichung „Schweißaussetzer“ gegliedert nach der Streckenenergie für das Marktsegment „Pressfittings“

Die Notwendigkeit, **Verbesserungen am Prozessschritt „Schweißen“** durchzuführen, wird für die betrachtete Fertigung durch diese Auswertungen, in Ergänzung zu Abschnitt 6.1.1, sehr deutlich. Grundsätzlich fällt ins Auge, dass die Qualitätsabweichung „Schweißnahtfehler“, über alle Marktsegmente gesehen, offensichtlich großes Potential für Prozessoptimierungen aufweist. Auf Grund der Heterogenität der Marktsegmente hinsichtlich ihrer Qualitätsanforderungen hat man sich zu einem produkt- und produktgruppenorientierten Verbesserungsprozess entschlossen.

Im Folgenden soll, unter Kapitel 6.1.2.2.1, die Abwicklung einer Prozessverbesserung auf Basis der risikogestützten Methodik für ein Produkt aus dem **Marktsegment „Automotive“** in Bezug auf die Qualitätsabweichungsgruppe „Schweißnahtfehler“ dargestellt werden.

Es handelt sich in diesem Fall nicht um Maßnahmen im Sinne einer stetigen Verbesserung, sondern um eine Weiterentwicklung, die auf einem partiellen Wechsel der Schweißtechnologie basiert. Somit kann der Unterschied zwischen Anwendung des WIG-Schweißens mit konstantem Gleichstrom und Anwendung des WIG-Schweißens mit geplustem Gleichstrom, hinsichtlich der Verbesserungspotentiale, praktisch dargestellt werden.

6.1.2.2.1 Fallbeispiel: Optimierung des Schweißverfahrens für die Erzeugung von Rohren zur Fertigung von Airbag-Zündern

Airbag-Zünder dienen dazu, die zur Aktivierung eines Airbags in Fahrzeugen benötigte Treibladung auszulösen und somit das Öffnen des Airbags mit entsprechend kurzen Reaktionszeiten gewährleisten zu können. Es handelt sich somit um ein sicherheitstechnisch sehr bedeutsames Bauteil in Kraftfahrzeugen, was durch die langen gewährten Garantiezeiten durch die Fahrzeughersteller noch unterstrichen wird. Um das Treibmittel vor Feuchtigkeit zu schützen, wird dieses in einer zylindrischen Metallhülse durch eine Glaskokille, in welche von gegenüberliegender Seite die Zündkontakte ragen, eingeschlossen. Um ein Eindiffundieren von Feuchtigkeit zwischen Glaskokille und Metallhülse zu vermeiden, wurde diese Hülse bis Ende der Neunziger Jahre als Präzisionsdrehteil ausgeführt. Durch die steigende Anwendung der Airbag-Technologie im Automobilbau und der damit stetig wachsenden Stückzahlen wurde ein Kosteneinsparungspotential darin erkannt, den fertigungsintensiven Drehteil durch ein Rohrstück aus hochlegiertem, korrosionsbeständigem Stahl zu ersetzen. Auf Grund der Bauteilgeometrie, die gekennzeichnet ist durch eine hohe Wanddicke bei geringem Außendurchmesser, kann ein walzprofiliertes, längsnahtgeschweißtes Rohr nur im nachgezogenen Zustand für diese Anwendung verwendet werden.

Für die Herstellung des Halbzeugs wird der Werkstoff X 2 CrNi 19 11 (1.4306) verwendet. Bei dessen Verarbeitung zu einem Edelstahlrohr mit einem Außendurchmesser von 10 Millimeter und einer Wanddicke von 1,5 Millimeter sind **zwei relevante Problembereiche** zu betrachten:

- Auf Grund der hohen Wanddicke im Verhältnis zum Durchmesser (Rohrdurchmesser/Rohrwanddicke = 6,5) befindet man sich in Bezug auf die benötigten **Umformkräfte im Grenzbereich**. Das kleinste definierte Durchmesser-Wanddicken-Verhältnis, laut DIN17457, liegt bei 8,3, zur Darstellung der Machbarkeit entsprechend der geltenden Normen und Regelwerke.

- Um ein Abschließen der eingebrachten Glaskokille an der Rohrwand gewährleisten zu können, werden höchste Anforderungen an die **Ausprägung der Innenoberfläche** gestellt. Da die Schweißnaht zwangsläufig eine Inhomogenität in diesem Zusammenhang darstellt, wird diese in ihrer Erscheinung sowohl explizit über Toleranzen als auch implizit über Grenzmuster definiert. Durch diese hohen Qualitätsanforderungen an die Ausprägung der Schweißnaht ergibt sich in Kombination mit der großen Wanddicke, welche zu höherer verwendeter Schweißenergie führt, eine schwierige Beherrschbarkeit des Schweißprozesses.

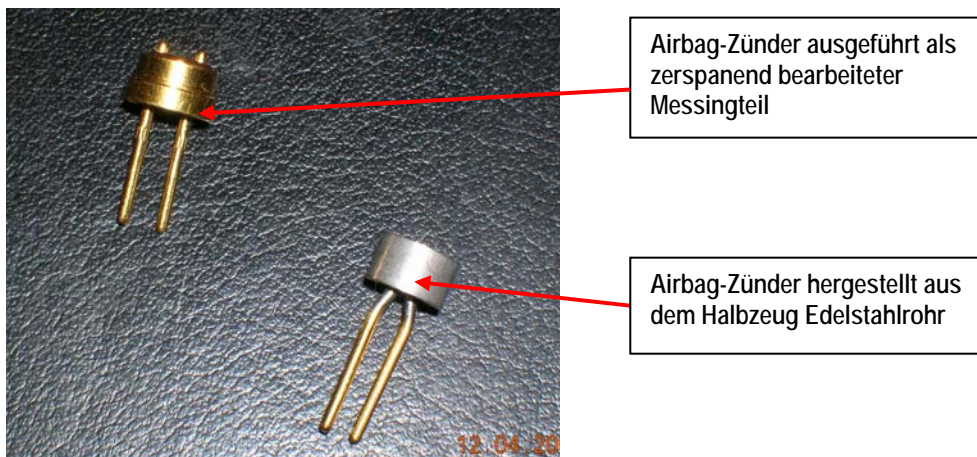


Abbildung 6.1.2.2.1-1: Ausführungsvarianten von Airbag-Zündern in der Automobilindustrie

Im Folgenden wird die Einsatzmöglichkeit des Walzprofilierens in Kombination mit der Fügetechnik Wolfram-Inertgas-Schweißen mit Gleichstrom (Minuspol an der Elektrode) unter Anwendung der Risikoquantifizierungszahl näher analysiert.

Betrachtet man das **Fehlerauftrittsrisiko-Pareto** der Qualitätsabweichungsstruktur nach Abbildung 9.3.1-2, so erkennt man, dass Schweißnahtfehler die bestimmende Qualitätsabweichung für die Fertigung dieses Produkts darstellen.

Gliedert man die Qualitätsabweichungsgruppe „Schweißnahtfehler“ nach dem Fehlerauftrittsrisiko, so ist, in Übereinstimmung mit den anderen Marktsegmenten, auch hier die **Qualitätsabweichung „Schweißaussetzer“** mit dem höchsten Risiko zu beurteilen.

Die benötigte Schweißenergie für die Anwendung des WIG-Schweißens wird, nach Abbildung 6.1.2.1.1-4, durch die Rohrwanddicke bestimmt. Auch bei größeren Blechdicken muss eine vollständige Erfassung der Schweißnahtwurzel an der Rohrinneenseite gewährleistet sein.

Bei Anwendung des WIG-Schweißens mit negativ gepolter Elektrode sind die Optimierungsmöglichkeiten zur Reduktion der Schweißenergie, um eine vollständige Durchschweißung zu sichern, sehr gering. Der einzig relevante Parameter um die Streckenenergie etwas senken zu können, ist die Konzentration des Wasserstoffs im Argon-Wasserstoff-Schutzgasgemisch zu erhöhen. Dies kann jedoch nur innerhalb von bestimmten Grenzen erfolgen, da es sonst zu negativen Einflüssen auf das Schweißgut selbst kommt (Porenbildung, Aufreißen der Schweißnahtoberfläche durch ausdiffundierenden Wasserstoff).

Beim **Konstantstrombetrieb des WIG-Schweißens** besteht ein empfindliches Verhältnis zwischen der zugeführten und der abgeleiteten Wärme in Bezug auf das Werkstück. Dieses Ungleichgewicht wird zur Erzeugung des Schmelzbades genutzt. Die geringste Veränderung des Schweißstroms, bedingt durch eine Änderung der Geometrie am Schweißspalt oder den Wärmestau im Werkstück, führt zu einer starken Veränderung der Schmelzbadausdehnung.

Verwendet man an Stelle des Gleichstroms pulsierenden Strom zur Erzeugung des Lichtbogens beim WIG-Schweißen, so spricht man vom **WIG-Impulsschweißen** [1].

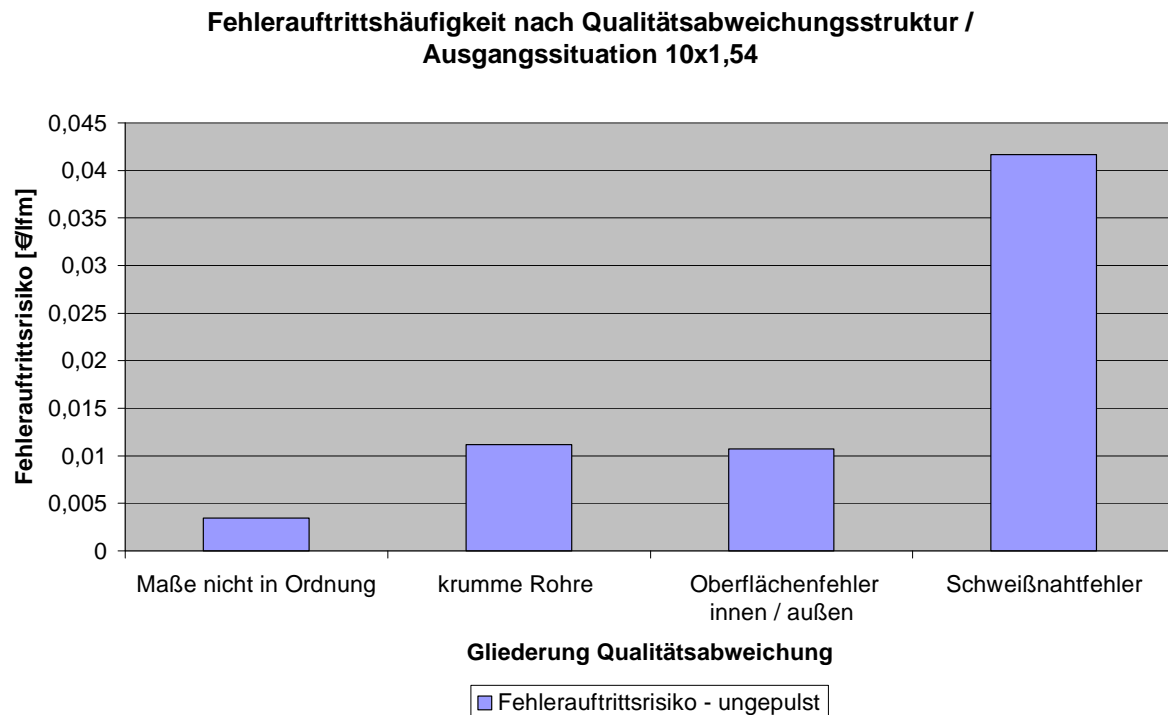


Abbildung 6.1.2.2.1-1: Fehlerauftrittsrisko für die Qualitätsabweichungsstruktur eines Edelstahlrohres zur Fertigung von Airbag-Zündern

Der grundsätzliche Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass innerhalb des Zeitfensters zwischen zwei Stromimpulsen das Schmelzbad leichter erstarren kann, wodurch der Einfluss des Wärmestaus auf die Stabilität des Schweißprozesses ausgeschaltet werden kann.

Durch die gestiegenen Möglichkeiten in Bezug auf die Leistungsfähigkeit der zur Verfügung stehenden Schweißstromquellen, hat es sich für diesen Anwendungsfall als zielführend erwiesen mit Frequenzen im kHz-Bereich zu arbeiten. Dieser hochfrequente Pulsbetrieb bietet einerseits den Vorteil den Lichtbogen zu stabilisieren und andererseits die Erstarrung des Schmelzbades positiv zu beeinflussen, was zu einem feinkörnigeren Schweißnahtgefüge führen kann [2].

Um die Leistungsfähigkeit des Verfahrens einschätzen zu können, wurden Versuchsreihen durchgeführt, wobei ausgehend von einer Produktionsgeschwindigkeit von ein Meter pro Minute diese auf bis zu drei Meter pro Minute, unter ständiger Kontrolle der Einhaltung der Qualitätsmerkmale, gesteigert wurde. Simultan wurden alle relevanten Prozessparameter aufgezeichnet, um sie jenen bei Anwendung der konventionellen WIG-Gleichstrom-Technologie gegenüberstellen zu können. Berechnet man aus Schweißstrom und –spannung die zugehörigen Schweißleistungen und trägt diese über der Schweißgeschwindigkeit auf, so lässt sich die geringere Wärmeinbringung beim WIG-Impulsschweißen nachweisen, wie in Abbildung 6.1.2.2.1-3 dargestellt.

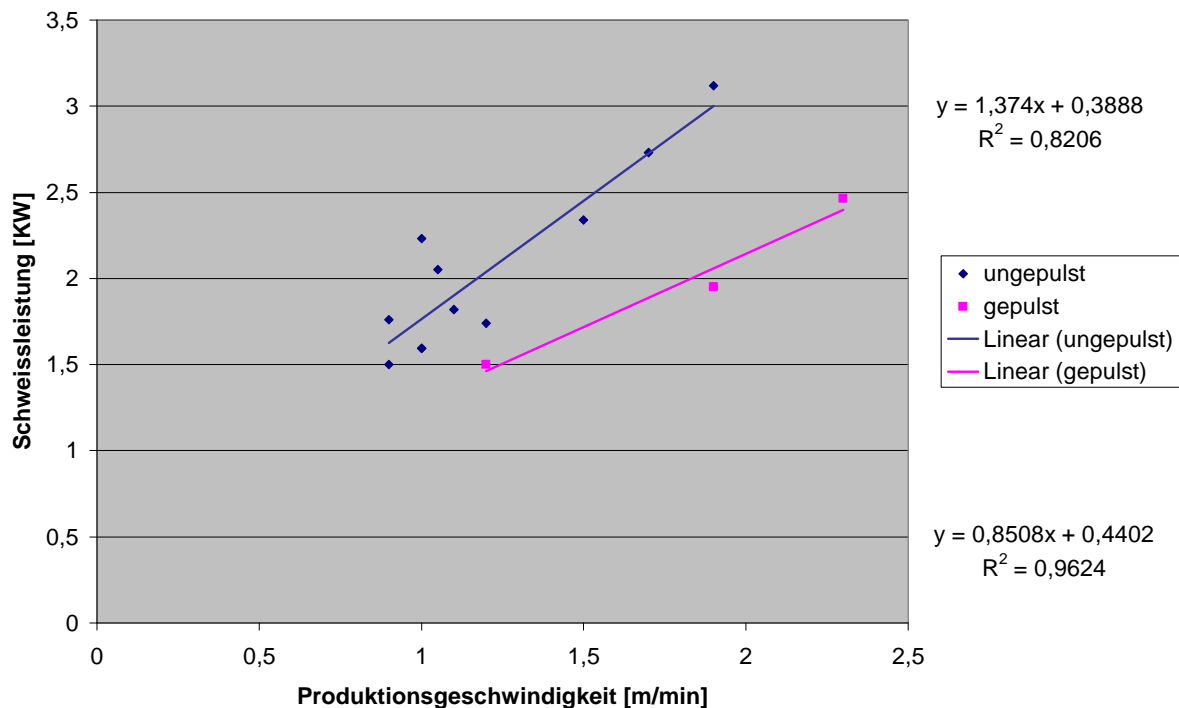


Abbildung 6.1.2.2.1-3: Vergleich Schweißleistung WIG und WIG-Puls als Funktion der Schweißgeschwindigkeit

Um die Wirksamkeit der Anwendung des WIG-Schweißens mit gepulstem Lichtbogen abschätzen zu können, wurde das Fehlerauftrittsrisiko der Qualitätsabweichungsgruppe „Schweißnahtfehler“ für die unter Einsatz von WIG-Puls produzierten Menge als Funktion der Produktionsgeschwindigkeit bestimmt und jener mit ungepulstem Lichtbogen geschweißten Menge gegenübergestellt. In Abbildung 6.1.2.2.1-6 sind nun sowohl Schweißleistung als auch Fehlerauftrittsrisiko über der gemeinsamen Abszisse „Produktionsgeschwindigkeit“ aufgetragen.

Betrachtet man den Fall der durchschnittlich verwendeten Produktionsgeschwindigkeit vor Einführung des WIG-Puls-Schweißens von 1,2m/min, so kann die Schweißenergie um 28,3% durch die Anwendung des pulsierenden Lichtbogens gesenkt werden. Gleichzeitig ist eine Reduktion des Fehlerauftrittsrisikos „Schweißnahtfehler“ um 56,4% zu beobachten. Noch ausgeprägter ist dieser Zusammenhang bei einer Produktionsgeschwindigkeit von 2m/min wahrzunehmen:

Die Schweißleistung geht um 31,7% auf 2,1KW zurück und das Fehlerauftrittsrisiko „Schweißnahtfehler“ sinkt um 78%.

Somit kann durch den Einsatz des WIG-Impulsschweißens nicht nur die **Produktionsgeschwindigkeit** bei gleich bleibender **Produktqualität erhöht** werden, sondern auch die **Prozessstabilität verbessert** werden.

Durch die bessere Kontrollierbarkeit des Schmelzbades kann auch die Form und der Übergang der Schweißnahtwurzel zum Grundwerkstoff verbessert werden. Bei längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren besteht bei Außendurchmessern kleiner 15 Millimeter keine Möglichkeit, die Schweißnahtwurzel im Inneren des Rohres innerhalb des Produkterstellungsprozesses abzutragen oder einzuwalzen. Auf Grund dessen besteht nur die Möglichkeit, eine zulässige Wurzelüberhöhung zu definieren, die aber nur direkt durch den Schweißprozess beeinflusst werden kann. Auf Grund des zuvor beschriebenen Sachverhalts in

Bezug auf das Abdichten der Glaskokille im Edelstahlrohr wurde die Wurzelüberhöhung auf 0,1 Millimeter eingeschränkt. Um diese Anforderung einhalten zu können, bildet sich beim WIG-Schweißen mit Gleichstrom eine sehr flache, fast etwas eingefallene Wurzel mit einem wenig homogenen Übergang zum Grundwerkstoff aus. Im Extremfall kann es sogar zu starker Kerbenbildung am Übergang zwischen Schweißnahtwurzel und Grundwerkstoff kommen, was sich besonders in Hinblick auf einen nachgelagerten Ziehprozess für Rohre negativ auswirkt. Beide Fälle der unerwünschten Wurzelausprägung sind in Abbildung 6.1.2.2.1-4 zusammengefasst.

Die Anwendung von WIG-Puls führt zu einem deutlich homogeneren Übergang zwischen Schweißnaht und Grundwerkstoff, ohne dabei ein Abflachen der Schweißnahtwurzel wie in Abbildung 6.1.2.2.1-5 dargestellt, in Kauf nehmen zu müssen.

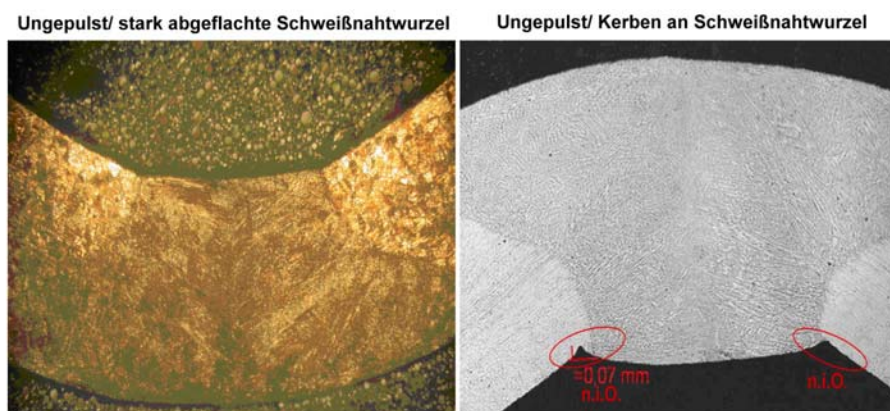


Abbildung 6.1.2.2.1-4: Schweißnahtgeometrie mittels WIG-Gleichstrom geschweißter Rohre

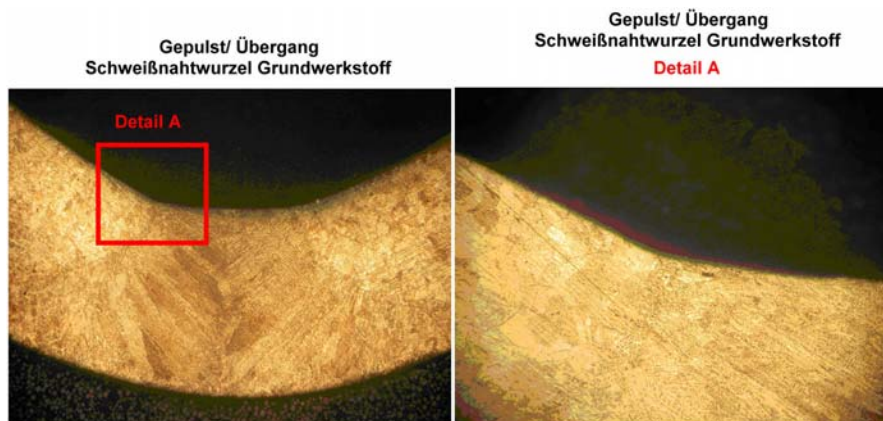


Abbildung 6.1.2.2.1-5: Schweißnahtgeometrie mittels WIG-Puls geschweißter Rohre

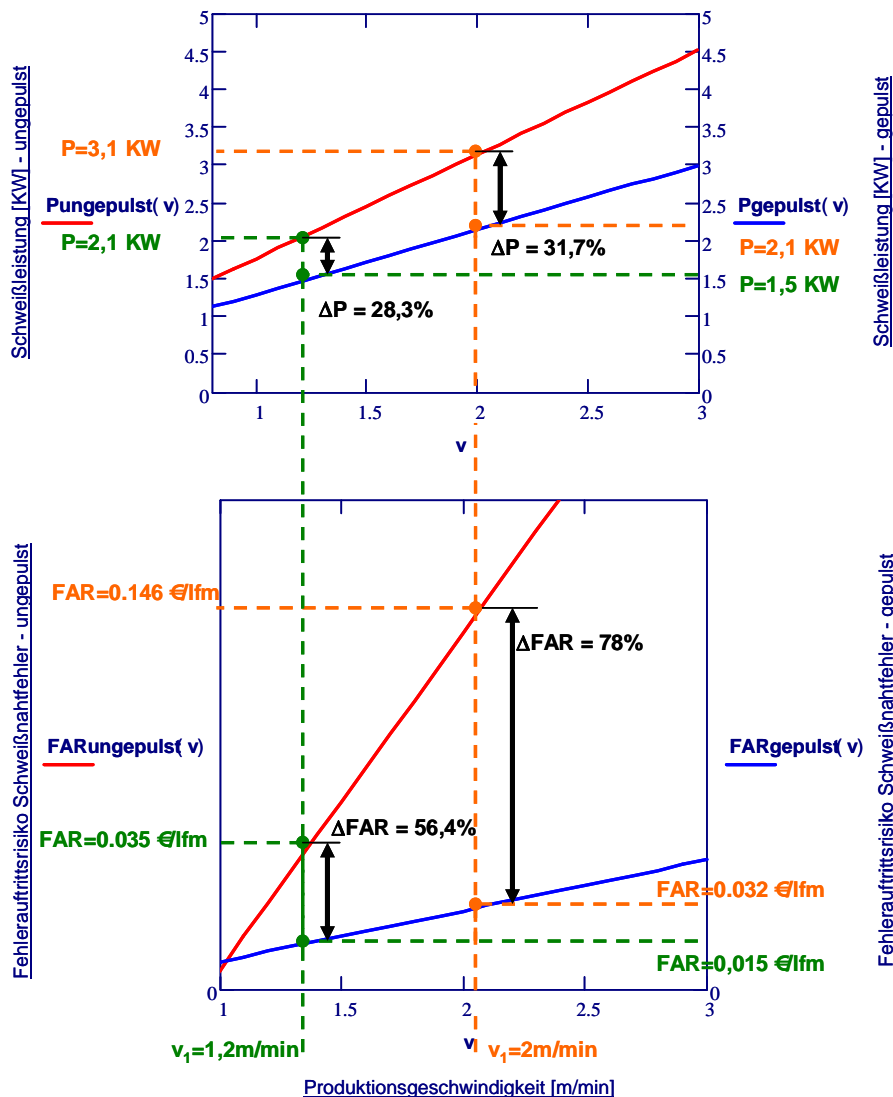


Abbildung 9.3.1-6: Darstellung der Prozessverbesserung durch WIG-Puls über die Parameter Produktionsgeschwindigkeit und Fehlerauftrittsrisko

6.1.3 Nahteinwalzung und Wärmebehandlung der Schweißnaht

Die Notwendigkeit der inhaltlichen Auseinandersetzung mit den Prozessschritten „Nahteinwalzung“ und „Wärmebehandlung“ für die betrachtete Fertigung, lässt sich unter anderem aus Abbildung 6.1.1-2 in Hinblick auf das Fehlerrisikofaktor für die zuordenbaren Qualitätsabweichungsgruppen „Anlauffarbe“ und „Glättung nicht in Ordnung“ ableiten.

Auf Grund der technischen Zusammenhänge, welche unter Kapitel 6.1.3.1 zusammengefasst werden, ist eine **gemeinschaftliche Betrachtung** dieser Prozessschritte zielführend. Durch diese Betrachtungsform kann ein entscheidender Vorteil gegenüber der Beschreibung auf Basis der angewendeten Produktnorm gewonnen werden.

Das Kapitel wird durch Darstellung relevanter Ergebnisse der Risikobestimmung für die Herstellungsschritte „Nahteinwalzung“ und „Wärmebehandlung“ für das Marktsegment „Pressfittings“ abgeschlossen.

6.1.3.1 Technische Zusammenhänge

6.1.3.1.1 Nahteinwalzung

Nach der Produktnorm DIN 17457 können die Schweißnähte automatisch geschweißter Rohre im Zuge der Fertigung durch geeignete Verfahren, wie beispielsweise durch Hämmern oder Walzen geglättet werden [29].

Die nötige **Kaltverformung der Schweißnaht** kann dabei grundsätzlich durch einen in die Rohrstraße integrierten Arbeitsschritt oder durch nachgelagerte Weiterverarbeitungsoperationen am bereits gesägten Rohr erfolgen. Kaltziehen und Kaltpilgern, nach Abbildung 3.1.1-1, sind traditionelle Verfahren, die als externe Bearbeitungsschritte in diesem Zusammenhang zum Einsatz kommen [88].

Die Beschreibung integrierter Verfahren zur kontinuierlichen Kaltverformung der Schweißnaht in einer Rohrschweißanlage basiert auf sehr uneinheitlichen Bezeichnungen. Im englischen Sprachgebrauch werden vorwiegend die Begriffe „bead hammering“ [89], „bead rolling“ [89] und „in-line bead readuction“ [88] verwendet. Im deutschen Sprachraum wird der Prozessschritt als „Nahteinwalzung“ [90] oder „Innenschweißnahtglättung“ [91] bezeichnet.

Eine solche **Nahteinwalzvorrichtung** ist in Bezug auf den Materialfluss der Rohrfertigung nach dem Schweißprozess angeordnet. Abbildung 3.2.3-2 zeigt das Layout einer solchen Rohrstraße. Die Umformung der Schweißnaht erfolgt dabei durch eine von außen über ein Werkzeug kontinuierlich aufgebrachte Umformkraft. Um eine ungewollte Verformung des gesamten Rohrquerschnitts oder ein Einknicken zu verhindern, muss ein Gegenhalten im Rohrinernen erfolgen. Somit kann die aufgebrachte Umformkraft zur Verformung der Rohrwand, besonders im Bereich der Schweißnaht, verwendet werden.

Die Arbeitsform einer Nahteinwalzung kann auf folgende Bewegungsabläufe zurückgeführt werden:

- **Zyklische Vertikalbewegung Oberrolle**

Einwalzvorrichtung bestehend aus Ober- und Unterrolle weist keine Relativbewegung in Bezug zur Vorschubrichtung des Rohres auf. Die Unterrolle liegt kontinuierlich an der Außenoberfläche der unteren Rohrhälfte an und dient zur Abstützung. Die Oberrolle wird zyklisch vertikal bewegt, wobei sie am unteren Wendepunkt am Rohr im Bereich der Schweißnaht auftrifft und dabei die nötige Umformkraft aufbringt. Als Gegenhalter im Inneren des Rohres dient ein zylindrischer Dorn, der in Abstimmung mit der zyklischen Bewegung der Oberrolle immer wieder in seine Ausgangsposition zurückgezogen wird, um die Vorschubbewegung des Rohres ausgleichen zu können [88] [89].

- **Zyklische Vertikal- und Horizontalbewegung Oberrolle**

Im Vergleich zur reinen zyklischen Vertikalbewegung wird für diese Arbeitsform das gesamte Einwalzgerüst mit Ober- und Unterrolle zusätzlich vertikal verschoben. Somit kommt es abwechselnd zu einem Hub gegen die Rohrvorschubrichtung und einem Hub in Rohrvorschubrichtung. Die Aufnahme der Walzkräfte im Rohrinernen

übernimmt wieder ein Dorn. Durch die Überlagerung der Bewegungen kann ein sanfteres Aufsetzen der Oberrolle auf der Schweißnaht, sowie eine Verlängerung des Walzbereichs je Hub erreicht werden [90] [91].

- **Kontinuierlich anliegende Ober- und Unterrolle**

Durch die Ausführung des Widerlagers im Rohrrinneren als Dorn mit Innenrollen ist es möglich Ober- und Unterrolle der Nahteinwalzung kontinuierlich an der Rohraußenoberfläche anliegen zu lassen. Dies bietet den Vorteil, keinerlei zyklisch bewegte Teile am Einwalzgerüst zu benötigen [88].

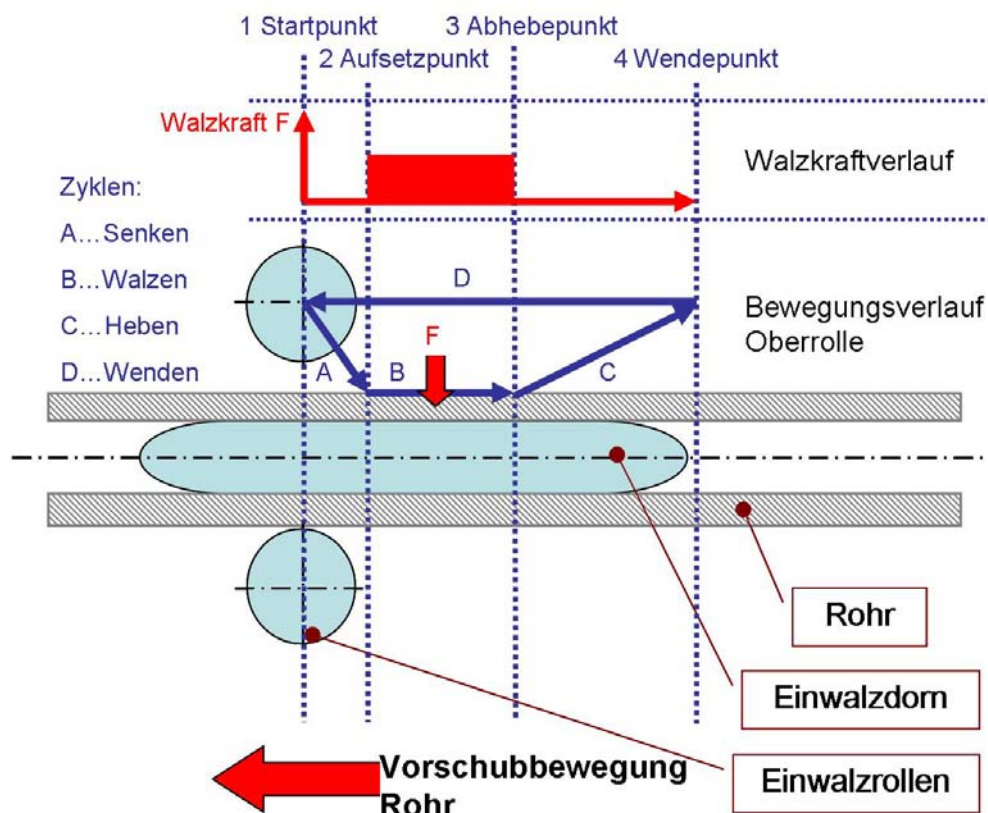


Abbildung 6.1.3.1.1-1: Funktionsprinzip Nahteinwalzung zyklisch vertikal und horizontal bewegte Oberrolle

An den Produktionseinrichtungen des betrachteten Rohrwerks kommen Nahteinwalzvorrichtungen zum Einsatz, die auf dem Prinzip einer vertikal und horizontal bewegten Oberrolle basieren. Zur Verdeutlichung des Funktionsprinzips sind in Abbildung 6.1.3.1.1-1 die Bewegungs- und Walzkraftverläufe dargestellt. Den zentralen Prozessparameter stellt die während des Zyklus „Walzen“ aufgebraachte Walzkraft dar. Da in diesem Anwendungsfall die Anpressung der Oberrolle hydraulisch durchgeführt wird, kann als Äquivalent für die Umformkraft der benötigte Druck am Pressenstempel verwendet werden. Dieser Druck soll im weiteren als **Walzdruck** bezeichnet werden. Entscheidend für das Ergebnis der Einwalzung der Schweißnaht ist unter anderem auch die Abstimmung der Bewegungsabläufe, um Beschädigungen der Rohroberfläche durch Walzrollen und Dorn zu vermeiden.

6.1.3.1.2 Wärmebehandlung

Edelstahlrohre nach der Produktnorm DIN 17457 müssen in der Ausführungsform „lösungsgeglüht und abgeschreckt“ gefertigt werden. Die Glühbehandlung soll bei einer Temperatur zwischen 1000 und 1120°C erfolgen. Es ist eine „ausreichend“ schnelle Abkühlung zu gewährleisten [29].

Lösungsglühen wird auch als Homogenisieren bezeichnet und vorwiegend für austenitische Werkstoffe eingesetzt. Die üblichen Haltezeiten liegen zwischen 30 Minuten und mehreren Stunden. Diese Wärmebehandlung verfolgt dabei folgende **Zielsetzungen** [92]:

- Vorhandene Karbidausscheidungen und intermetallische Phasen sollen durch die Wärmebehandlung wieder in Lösung gebracht und eine erneute Ausscheidung durch eine abschließende rasche Abkühlung unterdrückt werden. Dieser Mechanismus spielt vor allem in Bezug auf Chromcarbidausscheidungen in austenitischen Stählen eine zentrale Rolle zur **Vermeidung von interkristalliner Korrosion**.
- Kristallerholung und **Rekristallisation** von kaltverfestigtem Material

Diese grundlegende Betrachtung des Lösungsglühens führt auch zu den Motiven der Glühbehandlung an geschweißten Edlestahlrohren nach Abschnitt 3.2.3. Dabei steht die Gewährleistung der Eigenschaftsmerkmale nach DIN 17457 in Bezug auf Korrosionsbeständigkeit und Verformbarkeit im Vordergrund.

Eine konventionelle Lösungsglühbehandlung mit Haltezeiten größer 30 Minuten kann nur durch einen, der Rohrfertigung nachgelagerten, externen Glühofen abgebildet werden. Für das betrachtete Rohrwerk liegt der Schwerpunkt auf **integrierter Wärmebehandlung** in der Rohrstraße. In Bezug auf die grundsätzliche Unterscheidung dieser beiden Ansätze sei auf Kapitel 3.2.3 verwiesen.

In Abbildung 6.1.3.1.2-1 ist das Funktionsprinzip der zum Einsatz kommenden **In-Linie-Glüheinrichtung** dargestellt. Es handelt sich dabei um eine Form der Induktionserwärmung. Das Rohr, welches bereits die Stationen „Schweißen“ und „Einwalzen“, vgl. Abbildung 3.2.3-2, durchlaufen hat, wird durch einen Rundinduktor umschlossen. Durch die Anwendung von hochfrequenten Strömen kommt es zur Erwärmung des Rohres bis zum Spulenauslauf auf die geforderte Glühtemperatur [20]. Um Anlauffarben und korrosionsfördernde Rückstände an der Rohroberfläche zu vermeiden, findet die Wärmebehandlung unter Wasserstoffatmosphäre statt. Um eine ausreichend schnelle Abschreckung von der Glühtemperatur gewährleisten zu können, läuft das Rohr von der Glühbox in eine Kühlstrecke ein. Durch eine Wasserkühlung des Außenmantels kann die abzuführende Wärme über Grafitführungselemente nach außen abgeleitet werden.

Die **maximale Haltezeit** auf Glühtemperatur wird durch den Abstand zwischen Induktorauslauf und Einlauf Kühlstrecke bestimmt. Auf Grund des stetigen Vorschubs des Glühgutes hängt die sich tatsächlich einstellende Haltezeit von der Produktionsgeschwindigkeit des Rohres ab. Durch diese Konzeption zwar können, wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben, geringfügig höhere Glühtemperaturen als in einem Durchlaufofen erzielt werden, die erreichbaren Haltezeiten von einigen Sekunden, liegen aber deutlich unter den Anforderungen einer Lösungsglühung.

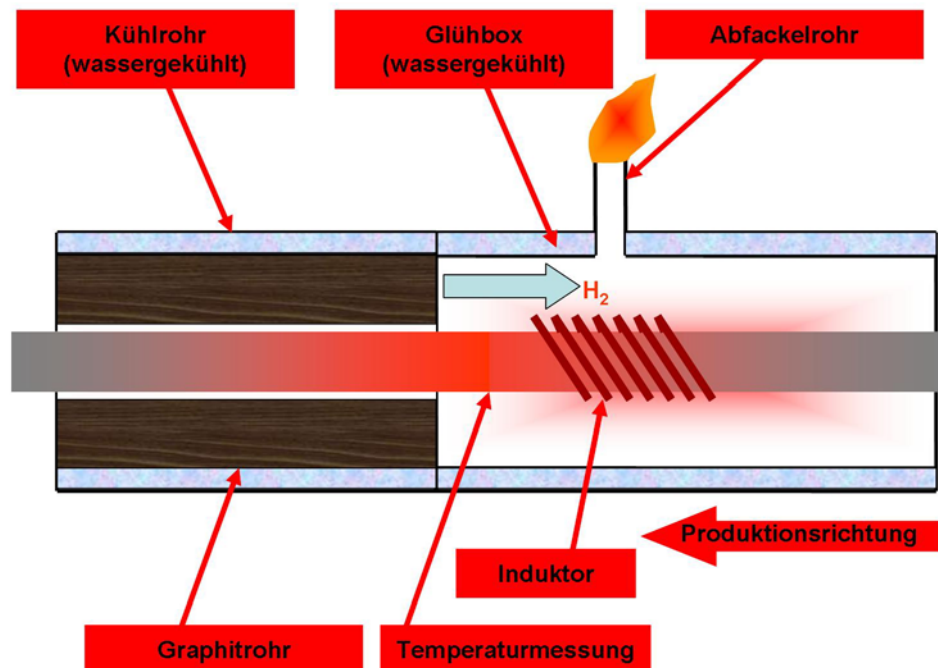


Abbildung 6.1.3.1.2-1: Funktionsprinzip In-Linie-Kurzzeitglühen

6.1.3.1.3 Zusammenhang zwischen Kaltverfestigung der Schweißnaht und Wärmebehandlung

Die Produktnorm **DIN 17457** berücksichtigt explizit nur den Zusammenhang zwischen dem Schweißen der Längsnaht und dem Lösungsglühen in Hinblick auf die mechanischen und korrosionschemischen Eigenschaften des Rohres. Zur Kennzeichnung von Edelstahlrohren mit kaltverfestigter Schweißnaht wird an das entsprechende Kurzzeichen ein der Index „g“ angehängt. Der einzuhaltende Vorgabewert für den Prozessschritt „Innennahtglättung“ bezieht sich dabei rein geometrisch auf die zulässige Wurzelüberhöhung [29].

Nach **DVGW Arbeitsblatt W541**, zur Fertigung von Edelstahlrohren für Trinkwasserleitungen, wird auf ein Kaltverformen der Schweißnaht durch eine Glättbehandlung nur durch folgenden Passus hingewiesen [93]: „Die Innenschweißnaht muss im unbearbeiteten oder bearbeiteten Zustand eine glatte Oberfläche besitzen.“ Bezüglich des Wärmebehandlungszustands von Rohren wird auf DIN 17457 verwiesen.

DIN 11850, angewendet für Edelstahlrohre in Medizintechnik und Lebensmittelindustrie, weist auf die Notwendigkeit einer Naht einwalzung hin, um die geforderten Rauheitswerte an der Schweißnahtwurzel erreichen zu können. Die Schweißnaht muss wanddickengleich eingeebnet und geglättet sein. Hinsichtlich der Wärmebehandlung wird auf DIN 17457 Bezug genommen [44].

Auch die Produktnorm **DIN 28181** zur Fertigung von Rohren für Rohrbündelwärmetauscher definiert rein die geometrische Ausprägungsform der Schweißnaht: „Die maximale Höhe des inneren Wulstes der Schweißnaht darf die angegebenen Grenzwerte nicht übersteigen.“ Bezüglich Wärmebehandlung wird auf DIN 17455 und DIN 17457 verwiesen [43].

Diese technischen Normen sehen das Einwalzen der Schweißnaht nur in Zusammenhang mit der erzielbaren **Geometrie und Oberflächenqualität** der Schweißnaht.

Es ist jedoch seit längerer Zeit nachweisbar, dass eine Kaltverfestigung nach dem Schweißen zu einer Vergleichmäßigung der Gussstruktur im Zuge der Wärmebehandlung beiträgt [88].

Durch eine Nahteinwalzung mit nachgelagerter Glühbehandlung kann es zu einer weitgehenden Aufhebung der **dendritischen Gefügeanteile** der Schweißnaht kommen [96]. Durch die so zusätzlich eingebrachte Kaltverfestigung wird die Kristallerholung und Rekristallisation im Zuge des Lösungsglühens erleichtert [94] [95].

Während die anfangs zitierten europäischen Regelwerke diesen grundlegenden Zusammenhang noch nicht berücksichtigen, findet er sich in den amerikanischen Produktnormen **ASTM A270** [97] für Trinkwasserleitungsrohre und **ASTM A249** [98] für Wärmetauscherrohre seit 1971 wieder. Damit kommt das Einwalzen der Schweißnaht auch für Produkte zur Anwendung, die auf Grund der Wanddickentoleranz, der maximal zulässigen Wurzelüberhöhung und der geforderten Rauigkeit gar keiner Glättbehandlung nach europäischer Auslegung bedürften. Wärmetauscherrohre sind ein typisches Beispiel hierfür, da hier die Kaltverfestigung der Naht rein zur Steigerung der Korrosionsbeständigkeit ausgerichtet ist.

6.1.3.2 Risikobetrachtung Nahteinwalzung und Glühen

Die **Qualitätsabweichung „Anlauffarben“** stellt nach Abbildung 6.1.1-2 ein zentrales Problem der betrachteten Fertigung von Edelstahlrohren dar. Auch wenn der auftretende Fehler mit freiem Auge sehr leicht zu erkennen ist, vgl. Anhang 7.2.3, und somit die Risikoquantifizierungszahl durch geringes Reklamationsrisiko bei verschwindend kleinen Werten, nach Abbildung 6.1.1.1, liegt, so stellt sich trotzdem die Frage nach den verursachenden Zusammenhängen.

Zu diesem Zweck wurden die Zusammenhänge folgender Größen näher analysiert:

- Lösungsglühtemperatur T [°C]
- Produktionsgeschwindigkeit v [m/min]
- 0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$ [N/mm²]
- Fehlerauftrittsrisiko Qualitätsabweichung „Anlauffarbe“ [€/lfm]

Die **0,2%-Dehngrenze** stellt für diese Zusammenstellung die unabhängige Variable dar. Über den Werkstoffkennwert $R_{p0,2}$ wird die Verformbarkeit des Edelstahlrohres definiert. Somit ergibt sich diese Größe, abgeleitet aus der Verarbeitung oder Endanwendung beim Kunden.

Bei den Größen „Lösungsglühtemperatur“ und „Produktionsgeschwindigkeit“ handelt es sich um Prozessparameter des Herstellungsprozesses. Wie unter Kapitel 6.1.3.1.2 hängen die Mechanismen im Zuge einer Lösungsglühung von den Parametern Glühtemperatur und Haltedauer ab. Für den Fall des In-Linie-Kurzzeitglühens, wie in diesem Fall angewendet, liegen die Glühtemperaturen zwischen 1000 und 1200°C. Dies ist um 80°C höher als der Maximalwert einer konventionellen Lösungsglühung. Da die Haltedauer für eine In-Linie-Glüheinrichtung durch die Vorschubgeschwindigkeit des Rohres begrenzt ist, dient die Glühtemperatur als entscheidender Prozessparameter, um die gewünschte 0,2%-Dehngrenze zu erreichen.

Abbildung 6.1.3.2-1 zeigt den Zusammenhang zwischen Lösungsglühtemperatur und $R_{p0,2}$ -Wert. Um den Sachverhalt klar darstellen zu können, wurde die Betrachtung auf eine Rohrstraße eingeschränkt. Dies ist notwendig, um verfälschende Einflüsse, die sich aus

folgenden Unterschieden im Aufbau der Glühleinrichtung ergeben, ausschließen zu können (vgl. Abbildung 6.1.3.1.2-1):

- Abstand zwischen Induktorauslauf und Einlauf Kühlstrecke
- Länge der Kühlstrecke

Edelstahlrohre mit Werten für 0,2%-Dehngrenze zwischen 190 und 285 N/mm² können als charakteristisch für die mechanischen Eigenschaften nach DIN 17457 angesehen werden. Es ist deutlich erkennbar, dass ein direkter Zusammenhang zwischen den beiden Größen besteht. Um niedrige $R_{p0,2}$ -Werte und damit bessere Verformbarkeit zu erhalten, ist es notwendig, die **Glühtemperatur** bis auf knapp unter 1200°C zu steigern. An dieser Stelle ist eine weitere Steigerung nicht mehr möglich, da die Stabilität des Glühgutes nicht mehr gewährleistet werden kann.

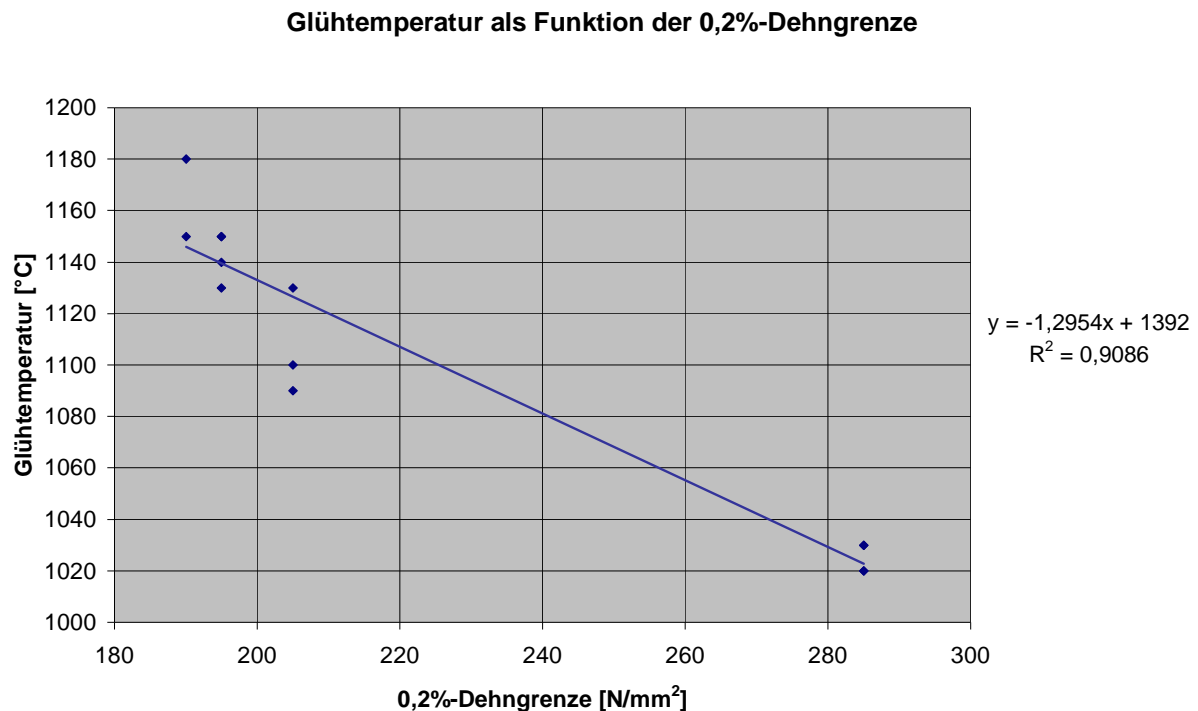


Abbildung 6.1.3.2-1: Lösungsglühtemperatur als Funktion der 0,2%-Dehngrenze bei Betrachtung einer Rohrstraße

Ist die Beeinflussung der Verformbarkeit über die Lösungsglühtemperatur bis an die Verfahrensgrenzen ausgeschöpft, so besteht die Möglichkeit die **Haltezeit** zu verlängern. Dies bedeutet bei konstantem Abstand zwischen Induktorauslauf und Einlauf Kühlstrecke eine Reduktion der Produktionsgeschwindigkeit der Rohrstraße. Durch Reduktion der Vorschubgeschwindigkeit von 4 auf 2 m/min wird die Haltezeit von 4,5 auf 9 Sekunden gesteigert. In Abbildung 6.1.3.2-2 wird die Bedeutung einer solchen Reduktion für die 0,2%-Dehngrenze abgebildet. Es bestätigt sich der Zusammenhang, dass eine Verlängerung der Haltezeit zu Erhöhung der Verformbarkeit führt.

Produktionsgeschwindigkeit als Funktion der 0,2%-Dehngrenze

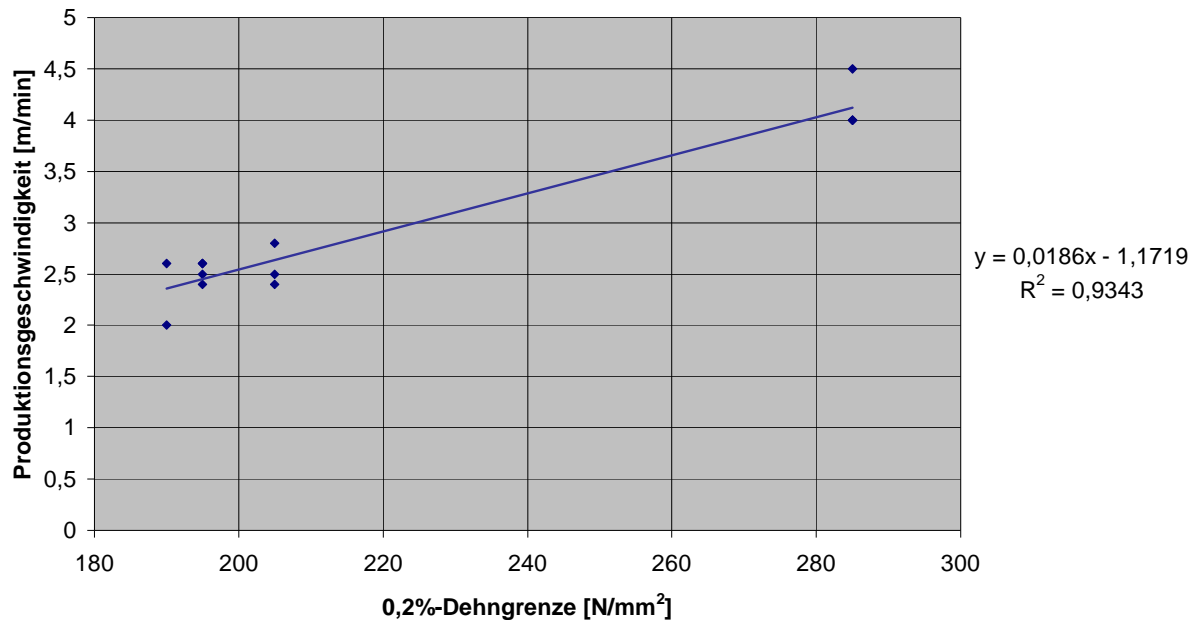


Abbildung 6.1.3.2-2: Produktionsgeschwindigkeit als Funktion der 0,2%-Dehngrenze bei Betrachtung einer Rohrstraße

Die Bildung von **Anlauffarben** auf der Rohroberfläche ist für den betrachteten Prozess auf das Austreten des mangelhaft abgeschreckten Rohres aus der Kühlstrecke zurückzuführen. Bei zu hoher Glüh­temperatur reicht die Wärmeabfuhr durch die Kühlstrecke nicht mehr aus, um das Glühgut auf unter 200°C am Auslauf abzukühlen. Verstärkt wird dieser Effekt durch hohe Vorschubgeschwindigkeiten, da die Verweildauer im Bereich des Kühlrohres somit reduziert wird. Diese Abhängigkeit kann auch auf Grund der ausgewerteten Prozessdaten, wie in Abbildung 6.1.3.2-3 dargestellt, nachgewiesen werden. Es zeigt sich, dass das Fehlerauftrittsrisiko für die Qualitätsabweichung „Anlauffarbe“ ab einer Lösungsglüh­temperatur von 1140°C sprunghaft ansteigt. Der Rohreintritt in die Glühbox und der Rohraustritt aus der Kühlstrecke muss gasdicht ausgeführt sein, um den Zuritt atmosphärischer Gase zu verhindern (vgl. Abbildung 6.1.3.1.2-1). Durch die verbleibende hohe Temperatur des Rohres am Ende des Kühlrohres ist eine Beschädigung dieser Abdichtungen sehr wahrscheinlich. Auch darin ist ein Grund für das deutliche Ansteigen des Fehlerauftrittsrisikos für Anlauffarben zu sehen.

Auf Grund des direkten Zusammenhangs zwischen Glüh­temperatur und der 0,2%-Dehngrenze, nach Abbildung 6.1.3.2-1, kann das Fehlerauftrittsrisiko für Anlauffarben auf das auslösende Kriterium zurückgeführt werden. Je niedriger der $R_{p0,2}$ -Wert, um den Anforderungen des Anwenders entsprechen zu können, desto höher das Fehlerauftrittsrisiko der Qualitätsabweichung „Anlauffarbe“. Nach Abbildung 6.1.3.2-4 wird der Maximalwert bei 190 N/mm² erreicht.

Aus diesem Ergebnis wurde für die betrachtete Fertigung als **Optimierungsmaßnahme** eine Anpassung der Kühlstreckenlänge vorgenommen. Durch den Einsatz eines modularen Systems kann die Länge an den abzuführenden Wärmeinhalt des Edelstahlrohres angepasst werden.

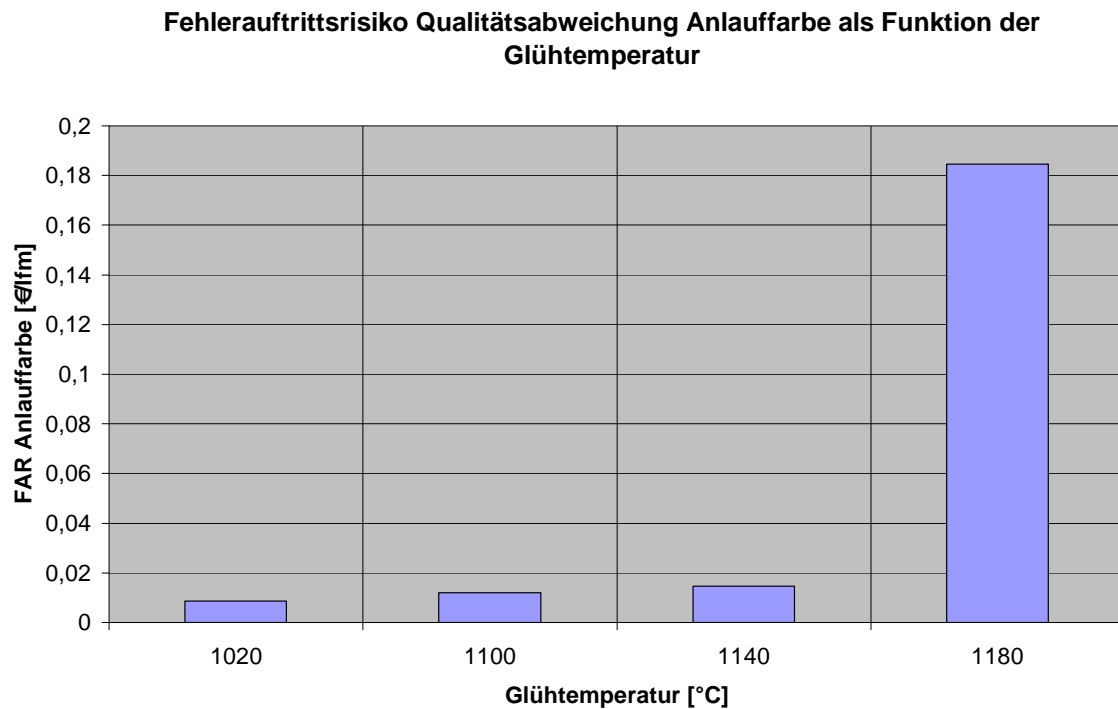


Abbildung 6.1.3.2-3: Fehlerauftrittsrisiko der Qualitätsabweichung „Anlauffarbe“ gegliedert nach der Lösungsglüh­temperatur bei Betrachtung einer Rohrstraße

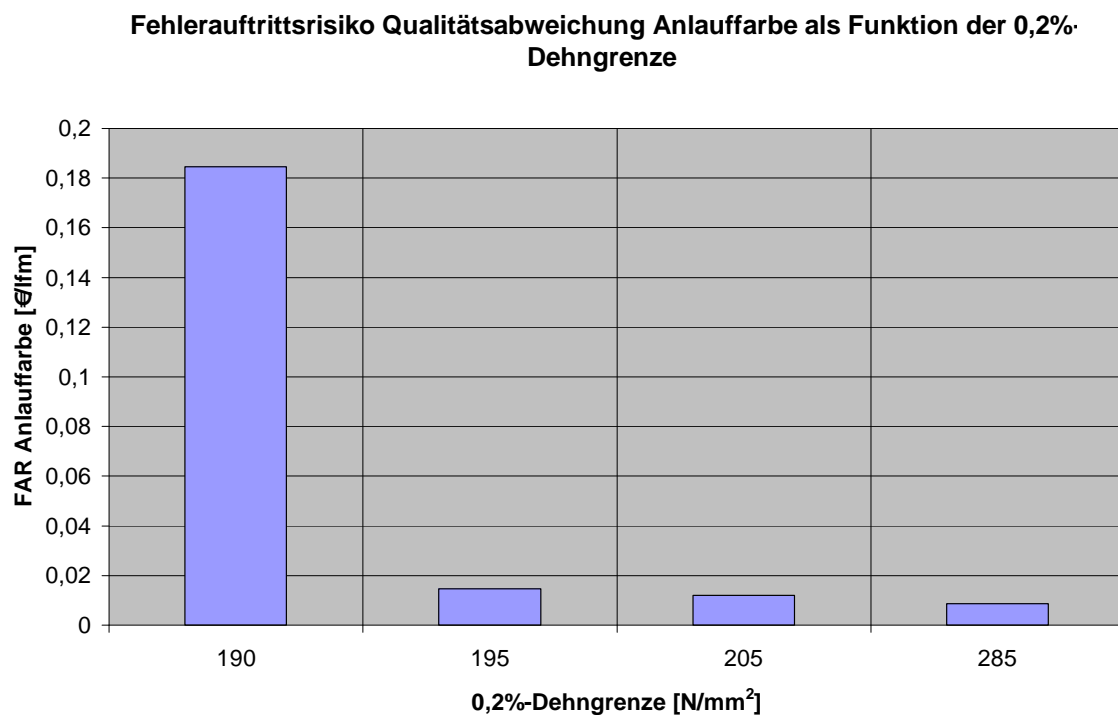


Abbildung 6.1.3.2-4: Fehlerauftrittsrisiko der Qualitätsabweichung „Anlauffarbe“ gegliedert nach der 0,2%-Dehngrenze bei Betrachtung einer Rohrstraße

Die dritte bedeutsame Qualitätsabweichungsgruppe in Bezug auf das Fehlerauftrittsrisiko ist nach Abbildung 6.1.1-2 die Kategorie „**Glättung nicht in Ordnung**“. Darunter sind folgende Fehler zusammengefasst, die im Zuge der Nahtleinwalzung auftreten können (vgl. Anhang 7.2.2):

- **Eindrücke durch Nahtleinwalzung** (Markierung an der Rohraußenoberfläche durch das Aufsetzen der Oberrolle)
- **Schlechte Glättung** (ungleichmäßige Verdrängung des Werkstoffs im Wurzelbereich)
- **Kratzer im Rohr** (Kerbe im Grundwerkstoff durch Relativbewegung des Einwalzdorns)
- **Riefen im Rohr** (Verformung des Rohrquerschnittes durch die aufgebrauchte Walzkraft)

Wie unter Abschnitt 6.1.3.1.3 ausgeführt, wird nach DIN 17457 auf eine Kaltverfestigung der Schweißnaht durch das Nachsetzzeichen „g“ hingewiesen. In Abbildung 6.1.3.2-5 ist die Ausführungsform k3 (aus Kaltband geschweißte Rohre, zunderfrei wärmebehandelt) mit der geglätteten Ausführungsform k3g in Bezug auf das Fehlerauftrittsrisiko „Glättung nicht in Ordnung“ verglichen. Es ist deutlich zu erkennen, dass ein wesentlich höheres Fehlerauftrittsrisiko für die geglättete Ausführungsform besteht. Dabei muss darauf hingewiesen werden, dass für den Fall des betrachteten Rohrwerks in der Mehrzahl der Fälle auch in der Ausführungsart k3 eine Kaltverfestigung der Schweißnaht durchgeführt wird. Ein solche Nahtleinwalzung wird dann bei geringeren Walzdrücken durchgeführt, um eine Verbesserung der Rundheit des Rohres oder die Einhaltung der Wanddickentoleranz sicherstellen zu können. Aus diesem Grund ergibt sich auch ein gewisses Fehlerauftrittsrisiko für Rohre in ungeglätteter Ausführung.

Als **charakteristisches Qualitätsmerkmal** in diesem Zusammenhang kann die Überhöhung der Schweißnahtwurzel angesehen werden. Je geringer die zulässige Schweißnahtüberhöhung desto höher die Anforderungen an den Prozessschritt „Nahtleinwalzung“. Wie bereits unter Abschnitt 6.1.2.1.2 beschrieben, kann dabei die Form der unbehandelten Schweißnaht nicht außer Acht gelassen werden. Die Gestalt der Schweißnahtwurzel und die mechanischen Eigenschaften der Naht sind ja nach verwendetem Schweißverfahren sehr unterschiedlich. Um von einheitlichen Voraussetzungen für die Betrachtung einer Nahtleinwalzung auszugehen, wurden ausschließlich WIG-geschweißte Rohre zusammengefasst. Die Abbildungen 6.1.2.1.1-1 und 6.1.2.1.2-2 zeigen den deutlichen Unterschied des geglätteten Zustandes zum ungeglätteten Zustand.

Entsprechend der angeführten Normenwerke, vgl. Abbildung 6.1.2.1.2-1, werden Vorgaben für die zulässige Überhöhung der Schweißnahtwurzel angegeben. Bei Betrachtung der Qualitätsmerkmalsstruktur nach Marktsegmenten ergibt sich in diesem Zusammenhang ein sich stark unterscheidendes Segment. Während man für Edelstahlrohre, die nach den Produktnormen DIN 17457 und DIN 28181 gefertigt werden, in einem Bereich für die zulässige Wurzelüberhöhung zwischen 0,1 und 0,3mm zu liegen kommen, wird für den Bereich „Pressfittings“ der Begriff „blecheben geglättet“ verwendet. Das zugehörige DVGW Arbeitsblatt W541 legt jedoch, nach Abschnitt 6.1.3.1.3, keine quantifizierbaren Größen zugrunde. In der Praxis liegt die Überhöhung der Schweißnaht im Rohrinernen, bei völlig „blechebener“ Ausführung, im Bereich kleiner 0,03mm.

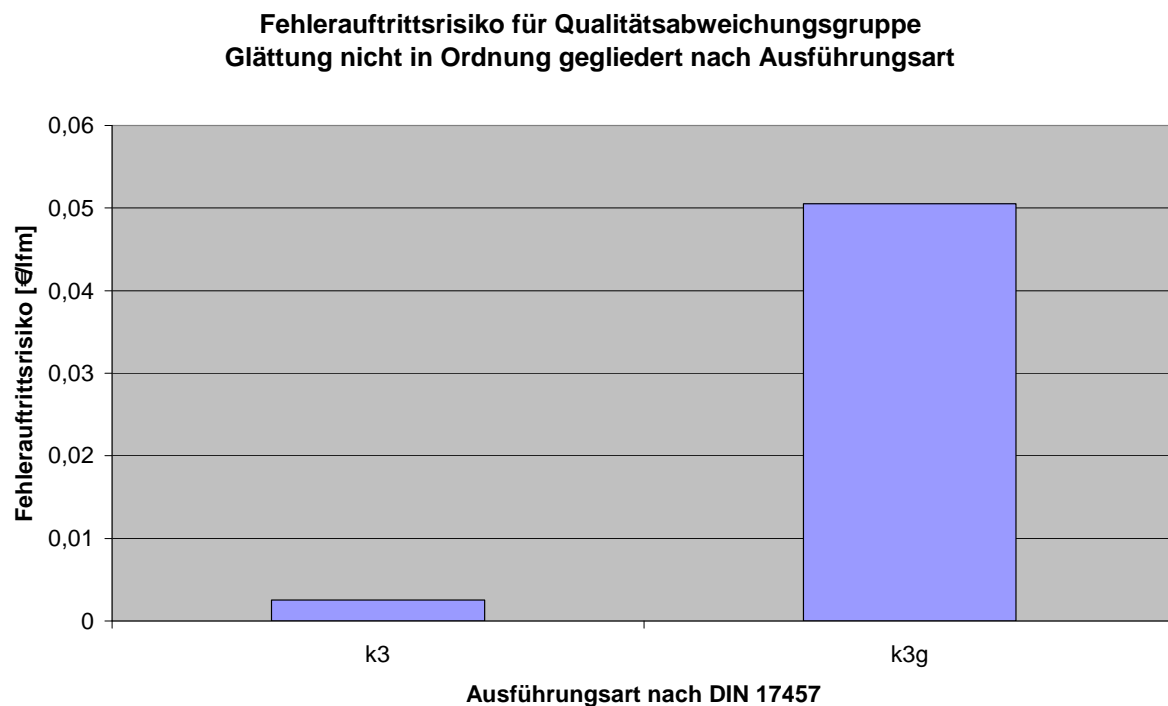


Abbildung 6.1.3.2-5: Fehlerauftrittsrisiko der Qualitätsabweichungsgruppe „Glättung nicht in Ordnung“ gegliedert nach der Ausführungsart lt. DIN 17457

Der Zusammenhang zwischen Fehlerauftrittsrisiko der Qualitätsabweichungsgruppe „Glättung nicht in Ordnung“ und den Anforderungen der betrachteten Marktsegmente wird in Abbildung 6.1.3.2-6 wiedergegeben. Zur Beschreibung der Qualitätsanforderungen wurde der Mittelwert der zulässigen Wurzelüberhöhung je Marktsegment herangezogen.

Das höchste Fehlerauftrittsrisiko ergibt sich, wie zu erwarten war, für das **Marktsegment „Pressfittings“**. Dieses Ergebnis ist auf die geringe mittlere Überhöhung der Schweißnaht von 0,02mm zurückzuführen. Das Auftrettsrisiko einer schlechten Glättung ist für alle anderen Marktsegmente deutlich geringer. Bewegt man sich innerhalb des Bereichs, welcher durch die Produktnormen beschrieben wird, so ist der direkte Einfluss der Wurzelüberhöhung geringer einzuschätzen. Dies ist auf größere Bereiche zurückzuführen, in denen sich die Verfahrensparameter bewegen können, ohne das stabile Prozessfenster zu verlassen. Trotzdem ergibt sich das niedrigste Fehlerauftrittsrisiko der Fehlergruppe „Glättung nicht in Ordnung“ für das Marktsegment „Türgriffe“, welchem die höchste zulässige Überhöhung der Schweißnaht zugeordnet ist.

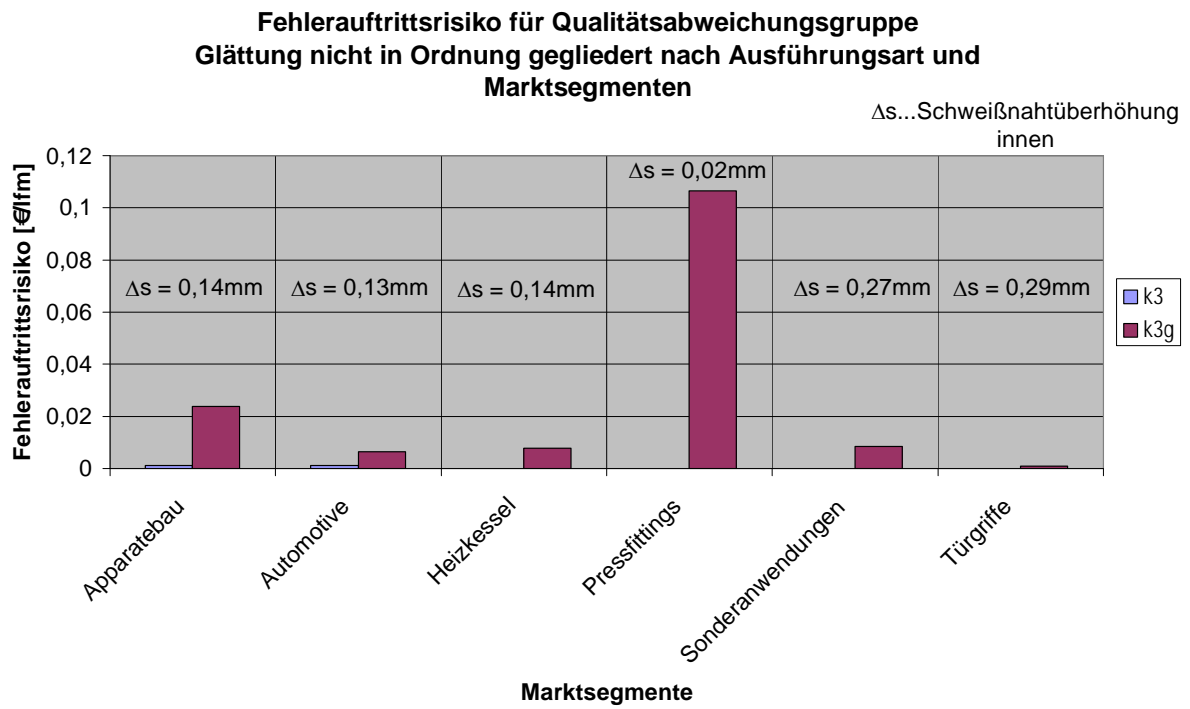


Abbildung 6.1.3.2-6: Fehlerauftrittsrisiko der Qualitätsabweichungsgruppe „Glättung nicht in Ordnung“ gegliedert nach der Ausführungsart lt. DIN 17457 und Marktsegmenten

6.2 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war die **Entwicklung einer Methode zur Risikobetrachtung** umformtechnischer Fertigungsprozesse. Diese Zielsetzung resultierte aus der Anforderung die Fertigung geschweißter Edelstahlrohre an steigenden Qualitätsanforderungen und geänderten Produkten anpassen zu können.

Eine anfängliche Literaturlauswertung schafft einen Überblick über die **Herstellverfahren von Edelstahlrohren** im Allgemeinen.

Um Transparenz über unterschiedliche **Güteklassen von Edelstahlrohren** auf Basis technisch spezifizierbarer Kriterien schaffen zu können, wurden folgende Schritte gesetzt:

- Zusammenstellung der relevanten **Produktnormen** für nahtlose und geschweißte Edelstahlrohre
- Beschreibung der Anforderungen auf Basis von technischen Normen und Regelwerken zur Gliederung nach **Einsetzbarkeit und Anwendung**
- Quervergleich der **Qualitätsunterschiede**, die sich aus normativen Vorgaben für Toleranzklassen ergeben.

Die Detailtiefe der Betrachtung wurde durch die Konzentration auf Edelstahlrohre in längsnahtgeschweißter Ausführung erhöht.

Als Ergebnis einer Analyse marktwirtschaftlicher Zusammenhänge in Bezug auf Kundenzusammensetzung, Marktvolumen, Marktwachstum, geographischer Lage und Fertigungsverfahren ist eine Gliederung des Marktes in **Hauptrohrarten auf Basis der Endanwendung** darstellbar.

Aus der Darstellung von Einflüssen eingesetzter Fertigungstechnologie zur Herstellung geschweißter Edelstahlrohre auf die Wettbewerbsfaktoren Zeit, Kosten und Qualität konnte eine produktionswirtschaftliche **Abgrenzung der Herstellungsverfahren** hinsichtlich der Einsetzbarkeit durchgeführt werden. Dabei wurden vor allem folgende Prozessschritte eingehend betrachtet:

- Einformen des Bandes
- Schweißen der Längsnaht
- Wärmebehandlung von Edelstahlrohren

Als Ausgangspunkt für die Konzeption einer Methode zur Risikobetrachtung eines Produkterstellungsprozesses wurde eine Literaturlaus über Managementwerkzeuge zur Effektivitätsbetrachtung der Produktion und einer Risikobestimmung allgemein durchgeführt. In Hinblick auf die Zielsetzung dieser Arbeit lag der Schwerpunkt der Betrachtung auf Möglichkeiten der quantitativen Risikoermittlung. Besonders der **Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)** ist eine eingehende Betrachtung gewidmet. Als zentrales Verbesserungspotential dieser Methode wurde die Einschränkung durch die vorhandene **Subjektivität** erkannt. Auf Basis dessen wurde die Notwendigkeit der **Ergänzung der FMEA** durch einen mathematisch bestimmbareren Risikobegriff abgeleitet.

Die Zielsetzung im Zuge der Entwicklung eines Werkzeugs zur risikogestützten Betrachtung eines Rohrherstellungsprozesses war es, eine Antwort auf folgende Fragestellung liefern zu können: „**Unter welchem Risiko ist ein Produkt fertigbar und welchen Gesamtnutzen kann es für den Hersteller liefern?**“

Um den zweiten Teil der Fragestellung über den Nutzen beantworten zu können, wurde eine Vorgehensweise erarbeitet, die es ermöglicht **Kundenanforderungen** an das Produkt an **messbare Qualitätskriterien** zu knüpfen. Dabei wurde eine Möglichkeit für die Verdichtung der Anforderungen aus Produktnormen entwickelt und unter dem Begriff „**Normenstrukturbaum**“ zusammengefasst. Diese Darstellungsweise stellt eine neue Form der Gruppierung von Qualitätsmerkmalen unter Erhöhung der Transparenz dar. Um diesen Teil der Fragestellung abschließen zu können, wurde eine Darstellung zur Ableitung des Funktionsbeitrags eines Qualitätsmerkmals für den Einsatzzweck abgeleitet und als **Qualitätsmerkmalsstruktur** beschrieben.

Als Zwischenschritt, um mit dem ersten Teil der anfangs gestellten Frage umgehen zu können, war es nötig, das Gefahrenpotential für Erzeuger von Produkten durch die Nichterfüllung des Funktionsbeitrags beim Endkunden durch Qualitätsabweichungen am Produkt zu beschreiben. Zu diesem Zwecke wird aus der Qualitätsmerkmalsstruktur deduktiv die **Qualitätsabweichungsstruktur** abgeleitet.

Um einen **quantitativen Maßstab** für die Beurteilung des Nutzens und des Gefahrenpotentials finden zu können, setzte man sich mit der Frage auseinander, ob Qualitätsanforderungen mit der verwendeten Fertigungstechnologie umsetzbar sind und wenn ja unter welchem Aufwand. Durch die Anpassung verbreiteter Managementwerkzeuge zur technischen Analyse und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eines Produktionsprozesses konnte der Ausgangspunkt für die **Verknüpfung** zwischen **Systemebene Prozess** und **Systemebene Produkt** geschaffen werden. Dabei können die Auftrittshäufigkeit von Prozessfehlern, die bestimmten Qualitätsabweichungen am Produkt zuordenbar sind, sowie die damit verbundenen Kosten erhoben werden.

Auf Basis dieser Daten kann das **Eintrittsrisiko** von Qualitätsabweichungen quantitativ bestimmt und damit auch der erste Teil der zu Beginn gestellten Frage beantwortet werden.

Dieser Ansatz wurde im weiteren zur Quantifizierung der FMEA verwendet, wobei neben dem **Fehlerauftrittsrisiko** auch das **Fehlerentdeckungs- und Reklamationsrisiko** hinzugefügt wurde. Abweichend zur Risikoprioritätszahl (RPZ) der FMEA wurde durch den Begriff „**Risikoquantifizierungszahl**“ (**RQZ**) eine Risikokenngröße auf monetärer Basis geschaffen. Dies erlaubt nicht nur die Betrachtung der Ergebnisse innerhalb der entwickelten Methode, sondern bietet auch die Möglichkeit einer Vergleichbarkeit zu anderen Systemen.

Das entwickelte Werkzeug zur quantitativen Risikobetrachtung wurde auch in Zusammenhang mit **Risikomanagementsystemen** (ERM) betrachtet. Dabei wird ergänzend zu üblichen ERM-Systemen **Risikomonitoring** im Sinne eines hierarchieübergreifenden Kreislaufprozesses abgebildet. Dieses Modell wird als unternehmensweiter Plan-Do-Check-Act-Kreis (**PDCA-Zyklus**) bezeichnet. Die Anwendung eines **qualitätsgestützten Risikoinformationssystems** in der entwickelten Form kann Mehrwert in folgenden Punkten für ein Unternehmen generieren:

- Durch die Durchgängigkeit des PDCA-Zyklus über alle Ebenen der Organisationsstruktur können immer entsprechend aufbereitete **Entscheidungsgrundlagen**, sowohl für operativ als auch strategisch orientierte Bereiche bereitgestellt werden.

- „Stillschweigendes“ **Wissen** kann kontinuierlich in explizites Wissen umgewandelt werden.
- **Optimierungspotentiale** im Produkterstellungsprozess können sehr differenziert aufgezeigt und geeignete Maßnahmen abgeleitet werden.
- Die **Grenzen der Fertigungstechnologie** können klar aufgezeigt werden.
- Eine mehrdimensionale Qualität-Fehler-Risiko-Betrachtung schafft durch Abbildung als OLAP-Datenwürfel eine sehr komfortable **Informationsquelle**.

Durch die **Anwendung** der entwickelten Methode für die Produkterstellung in einem Rohrwerk für längsnahtgeschweißte Edelstahlrohre lassen sich die beschriebenen Einsatzmöglichkeiten nachweisen. Folgende Ergebnisse als **Ausgangspunkte für Verbesserungsaktivitäten** können beispielhaft für die betrachtete Fertigung angegeben werden:

- Nutzen und Risiko konnten für die betrachteten **Marktsegmente** klar dargestellt werden.
- Qualitätsabweichungen, die sich auf Produktmerkmale beziehen, die keiner 100%-Prüfung unterliegen oder nur qualitativ beurteilbar sind, hatten ein wesentlich höheres **Reklamationsrisiko**.
- Größter Handlungsbedarf in Bezug auf die Fertigungstechnologie war für die **Prozessschritte** „Schweißen“, „Nahteinwalzung“ und „Glühen“ gegeben.
- Für den Prozessschritt **„Schweißen“** war ein Zusammenhang zwischen Wärmeeinbringung und Fehlerauftrittsrisiko von Schweißnahtfehlern klar nachweisbar.
- Die Abhängigkeiten folgender Parameter für die Prozessschritte **„Glühen“** und **„Nahteinwalzung“** konnten transparent dargestellt werden:
 - o Lösungsglühtemperatur
 - o Produktionsgeschwindigkeit
 - o 0,2%-Dehngrenze
 - o Fehlerauftrittsrisiko
- Das Fehlerauftrittsrisiko für den Prozessschritt „Nahteinwalzung“ war zur Differenzierung nach Ausführungsart des Rohres und zulässiger **Überhöhung der Schweißnahtwurzel** einsetzbar.
- Die **Wirksamkeit** durchgeführter Verbesserungen konnte sehr effizient durch die Risikobestimmung nachgewiesen werden.

Abschließend lässt sich festhalten, dass es sich bei der entwickelten Methode um ein qualifiziertes Hilfsmittel zur Ergänzung eines **risikogestützten Managementsystems** handelt. Es wurde somit ein Ansatz generiert, der zur Behebung klassischer Schwächen formaler Risikomanagementsysteme (Risikoidentifikation und –bewertung, Risikoaggregation, Risikocontrolling und –bewältigung, Organisationsform) [56] beitragen kann.

Da die **Kostenbetrachtung** einen zentralen Baustein für die Schaffung benötigter Datengrundlagen darstellt, wäre eine Auseinandersetzung mit dieser Thematik für die Kernfunktionen Produktion, Qualitäts- und Reklamationsmanagement eines Unternehmens ein entscheidender Schritt für die Weiterentwicklung in diesem Zusammenhang. Durch zunehmenden Aufbau umfangreicher Datenbestände wird eine strukturierte Schnittstellendefinition zu analytischen, **betriebswirtschaftlichen Informationssystemen** benötigt.

Es besteht die Möglichkeit, die entwickelte Methode auch auf andere Fertigungsverfahren und Phasen im Produktlebenszyklus anwenden zu können. Ausgehend von der durchgeführten Betrachtung des Abschnitts „Serienproduktion“ im Produktlebenszyklus, scheint eine Ausdehnung des Betrachtungssystems auch auf den **Produktentwicklungsprozess** sehr lohnenswert. Die strukturierte Rückführung der Ergebnisse als **Informationsquelle** für die Konstruktion und die Produktentwicklung verspricht eine interessante Perspektive. **Kundenorientierung** und **Produktivitätsdenken** könnten somit bereits in sehr frühen Stadien des Produktlebenszyklus, auf Basis **quantitativer Kriterien**, eingebracht werden. Weitverbreitete Methoden des präventiven Qualitätsmanagements, wie QFD oder FMEA, könnten damit sehr effizient unterstützt werden.

Durch die Weiterentwicklung und Vervollständigung der dargestellten Methode in der beschriebenen Weise wären noch erhebliche Potentiale zu erschließen.

7 Anhang

7.1 Struktur Qualitätsabweichungsgruppen

Verknüpfung Qualitätsabweichung - Normenstrukturbaum - Prozess				
Qualitätsabweichungsgruppen (Fehlergruppe)	Qualitätsabweichung (Fehler – Fehlerursache)	Normverweis DIN 17457	Prozessschritt	Auswirkung
Maße nicht in Ordnung	Riefen durch Formrolle	[F.3] (DIN 2463 Pkt. 4.3 - Tab. 2) Außendurchmesser / [D.2] (Tab. 6) Oberflächenbeschaffenheit	Formteil	2A+A
Oberflächenfehler innen/außen	Eindrücke durch Formrolle	[D.2] (Tab. 6) Oberflächenbeschaffenheit	Formteil	2A+A
Schweißnahtfehler	Schweißaussetzer	[A.1] Schweißnaht durchgeschweißt / [E] (5.9) Dichtheit	Schweißen	2A+A
Schweißnahtfehler	Spannungsrisse	[E] (5.9) Dichtheit / [C] (5.4) mechanisch und technologische Eigenschaften	Schweißen	2A+A
Schweißnahtfehler	Einbrand / Poren	[D.2] (Tab. 6) Oberflächenbeschaffenheit	Schweißen	2A+A
Schweißnahtfehler	Nicht durchgeschweißt	[A.1] Schweißnaht durchgeschweißt / [E] (5.9) Dichtheit	Schweißen	2A+A
Schweißnahtfehler	Kantenversatz	[F.4] (DIN 2463 Pkt. 4.3 - Tab. 2) Wanddicke / [D.2] (Tab. 6) Oberflächenbeschaffenheit	Schweißen	2A+A
Schweißnahtfehler	Danebengeschweißt	[A.1] Schweißnaht durchgeschweißt / [E] (5.9) Dichtheit	Schweißen	2A+A
Schweißnahtfehler	Einbrand	[F.4] (DIN 2463 Pkt. 4.3 - Tab. 2) Wanddicke / [D.2] (Tab. 6) Oberflächenbeschaffenheit	Schweißen	2A+A

Verknüpfung Qualitätsabweichung - Normenstrukturbaum - Prozess				
Qualitätsabweichungsgruppen (Fehlergruppe)	Qualitätsabweichung (Fehler – Fehlerursache)	Normverweis DIN 17457	Prozessschritt	Auswirkung
Oberflächenfehler innen/außen	Kratzer durch Schweißbacken	[D.2] (Tab. 6) Oberflächenbeschaffenheit	Schweißen	2A+A
Glättung nicht in Ordnung	Eindrücke durch Tibo	[D.2] (Tab. 6) Oberflächenbeschaffenheit	Einwalzung	2A+A
Glättung nicht in Ordnung	Schlechte Glättung	[F.4] (DIN 2463 Pkt. 4.3 - Tab. 2) Wanddicke / [D.3] (5.8.6) Wurzelüberhöhung	Einwalzung	2A+A
Glättung nicht in Ordnung	Kratzer im Rohr	[D.2] (Tab. 6) Oberflächenbeschaffenheit	Einwalzung	2A+A
Glättung nicht in Ordnung	Riefen im Rohr/ Dorn gewechselt	[F.4] (DIN 2463 Pkt. 4.3 - Tab. 2) Wanddicke / [D.2] (Tab. 6) Oberflächenbeschaffenheit	Einwalzung	2A+A
Maße nicht in Ordnung	Riefen am Rohr durch Reduziergerüste	[F.3] (DIN 2463 Pkt. 4.3 - Tab. 2) Außendurchmesser / [D.2] (Tab. 6) Oberflächenbeschaffenheit	Reduzierteil	2A+A
Oberflächenfehler innen/außen	Eindrücke am Rohr durch Reduzierteil	[D.2] (Tab. 6) Oberflächenbeschaffenheit	Reduzierteil	2A+A
Anlauffarbe	Rohre haben Anlauffarbe	[C.6] (Tab.3) Beständigkeit gegen IK	Glüher	2A+A
Oberflächenfehler innen/außen	Kratzer durch Grafite	[D.2] (Tab. 6) Oberflächenbeschaffenheit	Glüher	2A+A
Oberflächenfehler innen/außen	Glüherflecken	[C.6] (Tab.3) Beständigkeit gegen IK	Glüher	2A+A
Maße nicht in Ordnung	Probleme mit Rohrdurchmesser	[F.3] (DIN 2463 Pkt. 4.3 - Tab. 2) Außendurchmesser	Kalibrierteil	2A+A

Verknüpfung Qualitätsabweichung - Normenstrukturbaum - Prozess				
Qualitätsabweichungsgruppen (Fehlergruppe)	Qualitätsabweichung (Fehler – Fehlerursache)	Normverweis DIN 17457	Prozessschritt	Auswirkung
Maße nicht in Ordnung	Riefen durch Kalibriergerüste	[F.3] (DIN 2463 Pkt. 4.3 - Tab. 2) Außendurchmesser	Kalibrierteil	2A+A
Oberflächenfehler innen/außen	Eindrücke durch Kalibrierrolle	[D.2] (Tab. 6) Oberflächenbeschaffenheit	Kalibrierteil	2A+A
Oberflächenfehler innen/außen	Eindrücke am Rohr durch Sägebacken	[D.2] (Tab. 6) Oberflächenbeschaffenheit	Säge / Auswurf	2A+A
Oberflächenfehler innen/außen	Eindrücke durch Auswurf	[D.2] (Tab. 6) Oberflächenbeschaffenheit	Säge / Auswurf	2A+A
Oberflächenfehler innen/außen	Kratzer durch Sägebacken	[D.2] (Tab. 6) Oberflächenbeschaffenheit	Säge / Auswurf	2A+A
Maße nicht in Ordnung	Deformierte Enden durch Sägebacken	[F.3] (DIN 2463 Pkt. 4.3 - Tab. 2) Außendurchmesser	Säge / Auswurf	2A+A
Maße nicht in Ordnung	Deformierte Enden durch Sägeschnitt	[F.3] (DIN 2463 Pkt. 4.3 - Tab. 2) Außendurchmesser	Säge / Auswurf	2A+A
krumme Rohre	Krumme Rohre	[F.5] (DIN 2463 Pkt. 4.4 - Tab. 3) Geradheit	Gesamtprozess	2A+A
Maße nicht in Ordnung	Rohre aus Durchmesser-toleranz	[F.3] (DIN 2463 Pkt. 4.3 - Tab. 2) Aussendurchmesser	Gesamtprozess	2A+A
Maße nicht in Ordnung	Rohre aus Wanddickentoleranz	[F.4] (DIN 2463 Pkt. 4.3 - Tab. 2) Wanddicke	Gesamtprozess	2A+A
Oberflächenfehler innen/außen	Rauhigkeit n.i.O.	[D.2] (Tab. 6) Oberflächenbeschaffenheit	Gesamtprozess	2A+A

7.2 Fehlerkatalog

7.2.1 Schweißnahtfehler



Abbildung 7.2-1: Schweißnahtfehler / Nicht durchgeschweißt / Typ B (automatisierte Prüfeinrichtung)

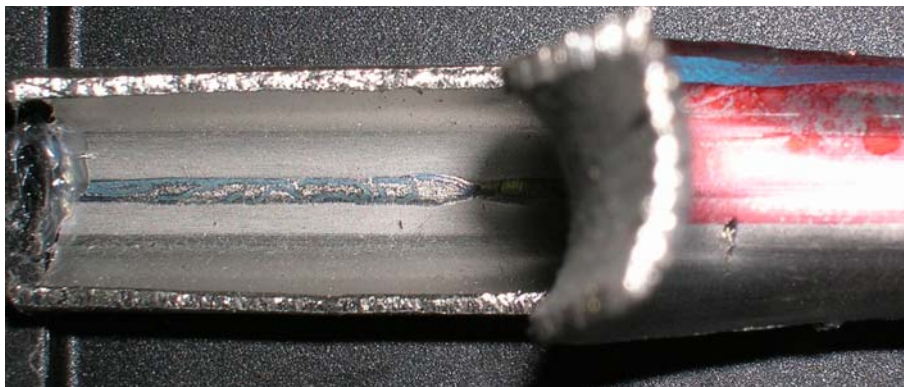


Abbildung 7.2-2: Schweißnahtfehler / Einbrand und Poren (Anlauffarben an der Schweißnahtwurzel) / Typ A (Selbstkontrolle Anlagenbediener)



Abbildung 7.2-3: Schweißnahtfehler / Schweißaussetzer (Durchfall des Schmelzbades) / Typ B (automatisierte Prüfeinrichtung)



Abbildung 7.2-4: Schweißnahtfehler / Kantenversatz (geglättete Ausführung) / Typ B (automatisierte Prüfeinrichtung)

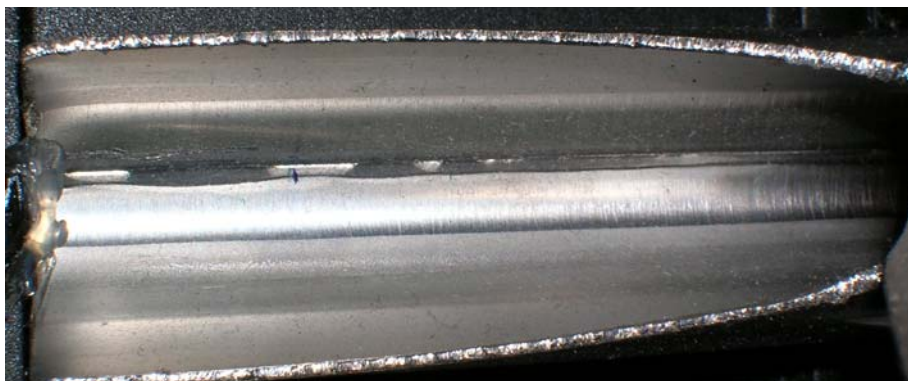


Abbildung 7.2-5: Schweißnahtfehler / Danebengeschweißt (Ungenauere Ausrichtung des Schweißspaltes zum Lichtbogen) / Typ B (automatisierte Prüfeinrichtung)



Abbildung 7.2-6: Schweißnahtfehler / Spannungsriss (Erstarrungsriss aus Heißrißneigung von Edelstählen und überlagerten Rückstellkräften) / Typ B (automatisierte Prüfeinrichtung)

7.2.2 Glättung nicht in Ordnung



Abbildung 7.2-6: Glättung nicht in Ordnung / Schlechte Glättung (ungleichmäßige Verdrängung des Werkstoffs im Wurzelbereich – „Kante“) / Typ B (automatisierte Prüfeinrichtung)

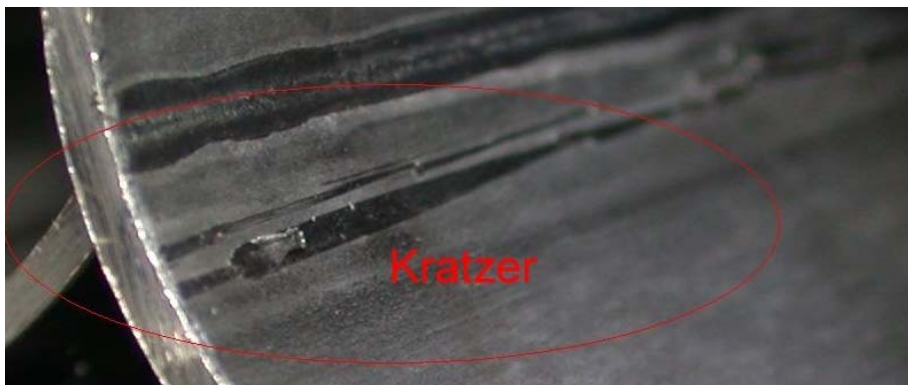


Abbildung 7.2-7: Glättung nicht in Ordnung / Kratzer im Rohr (Kerbe im Grundwerkstoff durch Relativbewegung des Einwalzdorns) / Typ B (automatisierte Prüfeinrichtung)

7.2.3 Anlauffarbe



Abbildung 7.2-8: Anlauffarbe (Kontakt des Glühguts mit atmosphärischen Gasen) / Typ A (Selbstkontrolle Anlagenbediener)

7.2.4 Krumme Rohre



Abbildung 7.2-9: Krumme Rohre / Typ A (Selbstkontrolle Anlagenbediener)

7.2.5 Oberflächenfehler innen / außen



Abbildung 7.2-10: Oberflächenfehler innen / außen / Glüherflecken (Verunreinigungen die im Zuge der Glühbehandlung auf die Rohroberfläche aufgebracht werden) /Typ A (Selbstkontrolle Anlagenbediener)

Literaturverzeichnis

- [1] Joni, N.; Einsatz von Impulsstromtechniken bei Lichtbogenschweißverfahren mit einem großen Anwendungsbereich, In: ZIS-Mitteilungen, 1988, Halle 30, S. 243-252
- [2] Watanabe, T., Nakamura, H., Ei, K.; Grain Refinement of Austenitic Stainless Steel Weld by Pulsed TIG Welding, In: Transactions of National Research Institute for Metals, 1987, Vol. 29, No. 4
- [3] Radaj, D.; Schweißprozeßsimulation: Grundlagen und Anwendung, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1999
- [4] Killing, U.; Geeignete Parameter für das Impulslichtbogenschweißen, In: Jahrbuch Schweißtechnik `94, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1993, S.108-114
- [5] Schellhase, M.; Der Schweißlichtbogen – ein technologisches Werkzeug, In: Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 84, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1985, S.86, S.97-99
- [6] Wang, J.; Kusumoto, K., Nezu, K.; Investigation into micro-tungsten inert gas arc behaviour and weld formation, In: Science and Technology of Welding and Joining, 2004, Vol.9, No.1; S. 90-94
- [7] Lancaster, J.F.; The Physics of Welding, Pergamon Press, Oxford, 1982
- [8] TRUMPF Lasertechnik, Werkzeug Laser, Vogel Buchverlag, Würzburg, 1.Auflage, 2006
- [9] Pires, J.N., Loureiro, A., Bolmsjö, G.; Welding Robots – Technology, System Issues and Application, Springer, Wien – New York, 2006
- [10] ROFIN Laser Diodes, General catalog, <http://www.rofin.com> (Laser Diodes), 2004
- [11] Pleteit, H.; Analyse und Modellierung der Keyhole-Dynamik beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen, Dissertation Universität Bremen, 2001

- [12] Skupin, J.; Nichtlinear dynamisches Modell zum Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen, Dissertation Universität Bremen, 2004
- [13] Fuerschbach, P.W.; Measurement and prediction of energy transfer efficiency in laser beam welding, In: Welding Journal, 1996, 75-1, S. 24-34
- [14] Mazumder, J., Procedure development and practice considerations for laser-beam welding, In: ASM Handbook, Volume 6, Welding, Brazing and Soldering
- [15] Cerjak, H.; Skriptum zur Vorlesung Sonderschweißverfahren, Institut für Werkstoffkunde, Schweißtechnik und Spanlose Formgebungsverfahren, TU-Graz, 2002
- [16] Hagen, E., Rubens, H.; Über Beziehungen des Reflexions- und Emissionsvermögens der Metalle zu ihrem elektrischen Leitvermögen, In: Annalen der Physik, 1893, 11, S. 873
- [17] Dausinger, F.; Strahlwerkzeug Laser – Energieeinkopplung und Prozesseffektivität, Teubner, Stuttgart, 1995
- [18] Brensing, K.-H., Sommer, B.; Herstellverfahren, In: Stahlrohr Handbuch, Vulkan, Essen, 1995, 12, S.91-152
- [19] Nichols, R. K.; The metallurgical effects of weld seam heat treating, In: Thermatool Publications, East Haven, USA, 1998, 116
- [20] Benkowsky, G.; Induktionserwärmung Härten-Glühen-Schmelzen-Löten-Schweißen, VEB Verlag Technik, Berlin, 1972, 4.Auflage
- [21] Hörmann, E.; Widerstands- und Induktionsschweißen von Rohren, In: Elektrowärme, 1961, 19-7, S.249-265
- [22] Flick, K.; Das Umstellen vorhandener Rohrschweißanlagen auf induktive Hochfrequenzerwärmung, In: Bänder, Bleche, Rohre, 1967, 2, S.70-76
- [23] Prospekt Fa. DREISTERN, Rohr- und Profilschweißanlagen, <http://www.dreistern.com>, 2007
- [24] Gorissen, E; Geschweißte Stahlrohre, In: Werkstatt und Betrieb, 1961, 93-10, S.741-747

- [25] Scott, P.F.; Key parameters of high frequency welding, In: TUBE 2000 "Welded Tube & Pipe – The Way Ahead", 1996
- [26] Udall, H.N., Nichols, R.K.; High frequency welding of stainless steel tubes, In: Thermatool Publications, East Haven, USA, 1999
- [27] DIN EN 10296-2 / Geschweißte kreisförmige Stahlrohre für den Maschinenbau und allgemeine technische Anwendungen – Technische Lieferbedingungen – Teil 2: Nichtrostende Stähle
- [28] DIN 17455 / Geschweißte kreisförmige Rohre aus austenitischen Stählen für allgemeine Anforderungen- Technische Lieferbedingungen
- [29] DIN 17457 / Geschweißte kreisförmige Rohre aus austenitischen Stählen für besondere Anforderungen- Technische Lieferbedingungen
- [30] von Baeckmann, W., Baltes, A., Tenzer, N.; Korrosion und Korrosionsschutz, In: Stahlrohr Handbuch, Vulkan, Essen, 1995, 12, S.382-451
- [31] DIN EN ISO 3651-2 / Ermittlung der Beständigkeit nichtrostender Stähle gegen interkristalline Korrosion - Teil 2: Nichtrostende austenitische und ferritisch-austenitische (Duplex)-Stähle; Korrosionsversuch in schwefelsäurehaltigen Medien
- [32] Suutala, N., Kurkela, M.; Localized corrosion resistance of high alloy austenitic stainless steels and welds, in: International Stainless Steels, Gothenburg, Schweden, 1984
- [33] Kuronen, M., Kyröläinen, A.; Pitting corrosion resistance of TIG, HF and LASER welds in stainless steel tubes, in: 7th Nordic Conference in Laser Processing of Materials, Vol. II, 1999, S. 335-345
- [34] Woolin, P.; Laser beam surface melting of high alloy austenitic stainless steel, In: Trends in Welding Research, Galtingburg, USA, 1995, S. 455-459
- [35] Hoepfl, U.; Schulungsunterlagen fischer Edelstahlrohre, KEMPPI, Butzbach, 2007
- [36] Contaminants in gas metal-arc welding – Facts about..., AGA AB, 1986

- [37] Schulze, G.; Die Metallurgie des Schweißens, Springer, Berlin, 2004, 3. Auflage
- [38] Operating Manual Cyclomatic, Cyclomatic Industries Inc., San Diego, 2003
- [39] Pasic, O.; Skriptum zur Vorlesung Schweißverfahren, Institut für Werkstoffkunde, Schweißtechnik und Spanlose Formgebungsverfahren, TU-Graz, 2002
- [40] DIN 17456 / Nahtlose kreisförmige Rohre aus nichtrostenden Stählen für allgemeine Anforderungen - Technische Lieferbedingungen
- [41] DIN 17458 / Nahtlose kreisförmige Rohre aus nichtrostenden Stählen für besondere Anforderungen - Technische Lieferbedingungen
- [42] DIN EN ISO 1127 / Nichtrostende Stahlrohre - Maße, Grenzabmaße und längenbezogene Massen
- [43] DIN 28181 / Geschweißte Stahlrohre für Rohrbündel-Wärmetauscher - Maße, Maßabweichungen und Werkstoffe
- [44] DIN 11850 / Rohre für Lebensmittel, Chemie und Pharmazie / Rohre aus nichtrostenden Stählen - Maße und Werkstoffe
- [45] The World Market for Welded Stainless Steel Tube & Pipe; Steel & Metals Market Research, Austria, 2005
- [46] DIN 8586 / Fertigungsverfahren Biegeumformen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- [47] Reschke, S.; Technisch-wirtschaftliche Möglichkeiten der Herstellung von Stahlrohren, Dissertation TU Aachen, 1994
- [48] Schmitz, F., Schleithoff, K.; Wärmebehandeln geschweißter Rohre aus nichtrostenden Stählen, in: Bänder, Bleche, Rohre, 10-1990, S. 2-6
- [49] Lippold, C., Kotecki, D.J.; Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels; WILEY, New Jersey, 2005

- [50] Hubert, G.; Das Blankglühen vom Chrom-Nickel- und Kohlenstoff-Stahlrohren mit Schnellkühlung, in: Stahl und Eisen, 99, 1979, Heft 11, S. 555-562
- [51] Neuhaus, F.: Neue Anwendungsbereiche für Kaltprofile im Spannungsfeld von Markt und Technik, In: Tagungsband 722, Studiengesellschaft Stahlanwendung e. V., Kolloquium „Walzprofilieren von Stahl“, 1998
- [52] Vitrian, E. S.; Beitrag zur Ermittlung von Kosten und Nutzen der präventiven Qualitätsmethoden QFD und FMEA, Dissertation TU Berlin, 2004
- [53] Weiß, S.; Längsnahtgeschweißte Rohre aus austenitischen nicht rostenden Stählen auf dem Weg vom reinen Halbzeug zum kundenorientierten Qualitätsprodukt, In: Tagungsband „Rohrherstellung und -verarbeitung“, Lehrstuhl für Umformtechnik – MU Leoben, 2007, S.125-144
- [54] VDA-Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie; 2. Auflage 2003, Band 4: Sicherung der Qualität während der Produktrealisierung Methoden und Verfahren - System-FMEA
- [55] Stamatelatos, M. G.; Risk Assessment and Management, Tools and Applications, In: NASA-Report “Mission Success with Safety”, Washington DC, USA, 2004
- [56] Gleißner, W., Romeike, F.; Risikomanagement, Haufe, München, Deutschland, 5. Auflage, 2005
- [57] Weiss, S., Buchmayr, B.; Methodik zur strukturierten Analyse eines Kaltprofilierprozesses am Beispiel der Herstellung von längsnahtgeschweißten Edelstahlrohren, In: BHM, Vol.151, Nr.9, S.337-343
- [58] Gassmann, O.; Innovation und Risiko – zwei Seiten einer Medaille, In: Management von Innovation und Risiko, Springer, Berlin – Heidelberg, 2. Auflage, 2006
- [59] Locker, A., Rösli, U.; Risikomanagement in der Beschaffung, In: Management von Innovation und Risiko, Springer, Berlin – Heidelberg, 2. Auflage, 2006

- [60] Fehler-Möglichkeiten und Einfluss-Analyse, In: Instruktionsleitfaden Ford Motor Company „Total Quality Excellence – Concept to Customer“, Dearborn, USA, 1988
- [61] Müller, D. H., Tietjen, T.; FMEA Praxis. Das Komplettpaket für Training und Anwendung, Hanser, München – Wien, 2000
- [62] ISO/TS 16949:2002, Qualitätsmanagementsysteme – Besondere Anforderungen bei Anwendung von ISO 9001:2000 für die Serien- und Ersatzteilproduktion in der Automobilindustrie, QMC-VDA, Frankfurt, 1. Auflage, 2002
- [63] Dietzsch, M., Althaus, K., Brandner, T.; Fehler früh erkennen, In: Qualität und Zuverlässigkeit, 1999, Ausgabe 11, S. 1394-1398
- [64] Edenhofer, B., Baumann, T., Esch, F., Knoop, O.; Richtig smart erst gemeinsam, In: Qualität und Zuverlässigkeit, 2002, Ausgabe 07, S. 732-735
- [65] Cassel, M.; ISO/TS 16949 Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie umsetzen, Hanser, München – Wien, 2007
- [66] Theden, P., Colsmann, H.; Qualitätstechniken, Hanser, München, Deutschland, 4. Auflage
- [67] Boutellier, R., Kalia, V.; Enterprise-Risk-Management: Notwendigkeit und Gestaltung, In: Management von Innovation und Risiko, Springer, Berlin – Heidelberg, 2. Auflage, 2006
- [68] Al-Radhi, M.; Konzept zur Steigerung der Effektivität von Produktionsanlagen, Dissertation TU Berlin, 1996
- [69] Hartmann, E.H.; TPM – Effiziente Instandhaltung und Maschinenmanagement, Verlag Moderne Industrie, Landsberg, 2. Auflage, 2001
- [70] Nakajima, S.; Management der Produktionseinrichtungen – Total Productive Maintenance, Campus Verlag, Frankfurt-New York, 1995
- [71] Kirstein, H.; Vorbeugende Wartung als QS-Maßnahme, in: Werkstatttechnik, Heft 1, 1991, S. 58-62
- [72] Shirose, K.; TPM for Operators, Productivity Press, Cambridge, 1992

- [73] Maggard, B.N.; TPM – Instandhaltung, die funktioniert, Verlag moderne Industrie, Landsberb, 1995
- [74] Haberkorn, T.; Total Productive Maintenance (TPM) - die umfassende produktive Instandhaltung, Diplomarbeit HTL Waidhofen a. d. Ybbs, 2001
- [75] Weiss, S., Buchmayr, B.; Risiken erkannt - kein Geld verbrannt, In: Qualität und Zuverlässigkeit (QZ), Vol.51, Nr.12, S.29-32
- [76] Baumann, R., Döhler, C., Hallek, J., Wintergerste, T.; Implementierung des Enterprise-Risk-Managments, In: Management von Innovation und Risiko, Springer, Berlin – Heidelberg, 2. Auflage, 2006
- [77] Boutellier, R., Gassmann, O.; Kreativität kontra Disziplin; Herausforderung des heutigen F & E-Managements, In: Management von Innovation und Risiko, Springer, Berlin – Heidelberg, 2. Auflage, 2006
- [78] Enkel, E.; Chancen und Risiken der Kundenintegration, In: Management von Innovation und Risiko, Springer, Berlin – Heidelberg, 2. Auflage, 2006
- [79] Chamoni, P., Gluchowski, P., Hahne, M.; Business Information Warehouse, Springer, Berlin-Heidelberg, 1. Auflage, 2005
- [80] VDA-Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie; 2. Auflage 2003, Band 4: Sicherung der Qualität während der Produktrealisierung Methoden und Verfahren – 8D-Report
- [81] Weiß, S.; Schulungsunterlagen Rollforming und Design von Rollensätzen mit dem Softwarepaket COPRA® M3 (data M Software GmbH), fischer Edelstahlrohre AUSTRIA, Griffen, 2007
- [82] Weiß, S.; Schulungsunterlagen Wärmebehandlung von Edelstahlrohren, fischer Edelstahlrohre AUSTRIA, Griffen, 2006
- [83] Codd, E.F., Codd, S.B., Sally, C.T.; Providing OLAP (On-Line Analytical Processing) to User-Analysis, in: An IT-Mandate White Paper, 1993
- [84] Gunchowski, P.; Data Warehouse, in: Informatik-Spektrum, Jg. 20, Heft 1, 1997, S. 48-49

- [85] VEKTOR Technische Unternehmensberatung, Physikalische Grundlagen der Wirbelstromprüfung, Schulungsunterlagen, 2004
- [86] SIKORA, SIKORA Extra Rohr und Schlauch – Durchmesserkontrolle und Regelung, <http://www.sikora.com>, 2006
- [87] Schmuller, J.; Statistik mit Excel für Dummies, Wiley-VCH, Weinheim, 1. Auflage, 2005
- [88] Janikowski, D.S., Roth, R.; Manufacturing and Testing of Welded Stainless Steel Tubing – You Have a Choice, in: Proceedings of PWR2006 ASME Power, Atlanta, 2006, S. 1-13
- [89] Travini, V.; Using bead hammering on welded tube, in: Tube international, January/February, 2000, S. 35-37
- [90] BOSSI Maschinen für die Fertigbearbeitung von Metallen, Innenschweißnahtglätter (Datenblatt), <http://www.bossi-srl.com>, 2004
- [91] OPPERMANN Beratende Ingenieure Rohrwerkstechnik, Nahteinwalzung (Datenblatt), www.oppermann-tube-plants.de, 2003
- [92] Liedtke, D.; Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen I, expert verlag, Renningen, 7. Auflage, 2007
- [93] DVGW Arbeitsblatt W541 / Rohre aus nichtrostenden Stählen und Titan für Trinkwasserinstallationen; Anforderungen und Prüfung, 1998
- [94] Martins, L., Plaut, R., Padilha, A.; Effect of carbon on the cold-worked state and annealing behavior of two 18wt%Cr-8wt%Ni austenitic stainless steels, in: ISIJ International, Vol.38, No.6, 1998, S. 572-579
- [95] Venugopal, S., Sivaprasad, P.V., Vasudevan, M., Mannan, S.L., Jha, S.K., Pandey, P., Prasad, Y.V.R.K.; Validation of processing maps for 304L stainless steel using hot forging, rolling und extrusion, in: Journal of Materials Processing Technology, 59, 1995, S. 343-350
- [96] Pitzer, S.; Edelstahlrohre in der Trinkwasser-Hausinstallation, in: IHKS FACH.JOURNAL, Ausgabe 2002/2003, S. 122-123

[97] ASTM A270 / Specification for Seamless and Welded Austenitic Stainless Steel Tubing

[98] ASTM A249 / Specification for Welded Austenitic Steel Boiler, Superheater, Heat-Exchanger and Condenser Tubes