

Berichte aus dem
Institut für Werkzeugmaschinen



Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. mult. Dr. h.c. mult. U. Heisel

Konstruktion und Fertigung

Yiqing Yan

**Neue Systematik mit erweiterten
Definitionen der Bezüge und
Tolerierungen für Geometrieelemente**

Band 65

Universität Stuttgart



Neue Systematik mit erweiterten Definitionen der Bezüge und Tolerierungen für Geometrieelemente

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

M. Sc. Yiqing Yan

geboren in Jiangxi, China

Hauptberichter: Prof. i. R. Dr.-Ing. Prof. h. c. mult. Dr. h. c. mult. Uwe Heisel

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz

Tag der mündlichen Prüfung: 30.11.2018

Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart

2019

Herausgeber:

Univ.-Prof. i. R. Dr.-Ing. Prof. h. c. mult. Dr. h. c. mult. Uwe Heisel

Institut für Werkzeugmaschinen

Universität Stuttgart

D 93

Auflage: 150 Exemplare

ISBN 978-3-00-061987-8

Neue Systematik mit erweiterten Definitionen der Bezüge und Tolerierungen für Geometrieelemente

Kurzreferat:

Die ISO Geometrische Produktspezifikation (GPS) ist ein internationaler Standard für Bemaßungen, Spezifikationen und die Verifikation von Geometrieelementen. Die ISO GPS Normung besitzt 143 einzelne Normungen, wovon zwei zu den wichtigsten gehören: DIN EN ISO 5459 Bezüge und Bezugssysteme und DIN EN ISO 1101 Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf.

In den beiden Normen fehlt jeweils eine grundsätzliche logische und in sich konsistente Systematik, um die vollständigen Definitionen der Bezüge und Toleranzsymbole für alle Geometrieelemente zu erstellen. Schwerpunkt der ISO ist der klassische Maschinenbau mit Regel-Geometrien. Freiformgeometrien werden in ISO nicht explizit berücksichtigt. Von daher existieren Definitionslücken, Defizite und Widersprüche zwischen und innerhalb der ISO GPS Normen. Dies führt zu Missverständnissen, Interpretationsspielräumen und Irreproduzierbarkeit der Definitionen von Bezügen und Tolerierungen an Geometrieelementen in Theorie und Praxis.

Diese Arbeit fokussiert sich auf die Entwicklung einer vollständigen Systematik zur Ergänzung und Erweiterung der Definitionen von Bezügen und Tolerierungen für alle Geometrieelemente in allen Industriebereichen, indem die Herkunft und das physikalische Verhalten der Bezugsgeometrieelemente und der tolerierten Geometrieelemente analysiert werden. Die Analysemethode ist komplett neu im Vergleich zu den ISO GPS Denkmodell.

Als Ergebnis wurde eine vollständige Systematik mit erweiterten Definitionen der Bezüge und Tolerierungen für alle Geometrieelemente auf Basis der wichtigsten ISO GPS Normen (DIN EN ISO 5459, 1101, 1660 und 5458) entwickelt. Die entwickelte Systematik kann nicht nur für den klassischen Maschinenbaubereich, sondern auch in Industrien verwendet werden, welche mit Freiformgeometrien arbeiten. Sie bietet nicht nur theoretisch, sondern auch praxisorientierte Definitionen und Beispiele zu Bezügen und Tolerierungen an. Zwei von den entwickelten Vorschlägen in dieser Arbeit wurden bereits in den ISO/DIS 5459:2017 Entwurf aufgenommen.

New systematology with enhanced definitions of datums and tolerances for geometrical features

Abstract:

ISO Geometrical Product Specifications (GPS) is an international standard for dimensioning, tolerancing and verifying of geometrical features. The ISO GPS standard includes 143 individual standards and two of them are among the most important GPS standards: DIN EN ISO 5459 datums and datum systems and DIN EN ISO 1101 tolerances of form, orientation, location and run-out.

A fundamental analyzed and consistent systematology is missing in these two standards, which is in order to define completed definitions of datums and tolerance symbols for all the geometrical features. Moreover, ISO is mainly considered only classical mechanical engineering with regular geometry features. Freeform geometries are rarely considered in ISO. Therefore there are definition gaps, deficits and contradictions that exist between and within the ISO GPS standards. This causes the misunderstandings, interpretation spaces and irreproducibility of the definitions of datums and tolerances for geometrical features in theory and practice.

This work focuses on developing a new systematology to complement and enhance the definitions of datums and tolerances for all geometrical features in all areas based on the ISO GPS standards. This systematology is developed by analyzing the origin and physical behavior of the datum features and toleranced features on a theoretical level. The analysis method is completely new compared to ISO GPS thinking model.

As a result, an improved and completed systematology with extended definitions of datums and tolerances for geometrical features based on the most important ISO GPS standards (DIN EN ISO 5459, 1101, 1660 and 5458) is developed, which fills the definition gaps and eliminates the deficits and contradictions. This new developed systematology covers almost all application areas, which is not only in the classical mechanical engineering sector, but also for industry with freeform geometry. It offers not only theoretical-oriented definitions and examples of datums and tolerances, but also practice-oriented definitions and examples. Two of the developed proposals have already been included in ISO/DIS 5459: 2017 draft.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen einer Industriepromotion, welche von dem Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Heisel und der Forschung und Entwicklungsabteilung - Toleranzmanagement der Daimler AG zusammen betreut wurde.

An dieser Stelle möchte ich meinen besonderen Dank nachstehenden Personen entgegen bringen, ohne deren Mithilfe die Anfertigung dieser Promotionsschrift niemals zustande gekommen wäre:

Mein außerordentlicher Dank gilt zuerst Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Heisel, meinem Doktorvater, für die Betreuung dieser Arbeit, die freundliche Hilfe, mühevoll Geduld, liebevolles Verständnis, tatkräftige Unterstützung und das Vermitteln des Sinns einer wissenschaftlichen Arbeit. Die Gelegenheiten der Teilnahme auf vielfältigen renommierten internationalen Konferenzen haben mir einen Blick in die Tiefe der Wissenschaft ermöglicht. Die zahlreichen Gespräche auf intellektueller und persönlicher Ebene werden mir immer als bereichernder und konstruktiver Austausch in Erinnerung bleiben. Ich habe unsere Dialoge stets als Ermutigung und Motivation empfunden.

Ich bedanke mich herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz für die hilfsbereite und wissenschaftliche Betreuung als Zweitgutachter.

Mein herauszustellender Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Martin Bohn und Herrn Andreas Pietsch, meinen Industriebetreuern der Daimler AG, für die Ideengebung, welche mir einen guten fachlichen Zugang zu dieser Thematik eröffnete. Die mehrfache Durchsicht dieser Abhandlung, ihre kritischen Betrachtungen, ihre differenzierten Anmerkungen sowie die mit ihnen zweckdienlichen Diskussionen, haben mir Kraft und Mut zur Anfertigung und Vollendung meiner Dissertation gegeben.

Ganz großer Dank geht an alle meine Kolleginnen und Kollegen im Toleranzmanagement der Daimler AG und meinem Freund – Dimitrij Chudinow, ohne deren Unterstützung in dieser beschwerlichen Zeit ein solcher Arbeitsumfang niemals hätte gelingen können.

Mein ganz besonderer Dank aber gilt meinen Eltern, Ling Xiao und Zhangjin Yan, die mir meinen bisherigen Lebensweg ermöglichten und denen ich diese Arbeit widme.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik und Defizite	3
2.1	Stand der Normen und Defizite	3
2.1.1	ISO 14368: Stand der Technik und Defizite	4
2.1.2	ISO 5459: Stand der Technik und Defizite	5
2.1.3	ISO 1101 und ISO 1660: Stand der Technik und Defizite	13
2.1.4	ISO 1101 und ISO 5458: Stand der Technik und Defizite	16
2.1.5	ASME Y14.5: Stand der Technik und Defizite	24
2.2	Industrielle Praxis und Defizite	26
2.2.1	Firmennormen	26
2.2.2	Praxisanwendungen und Defizite	27
2.3	Stand der Forschung zu Bezügen und Tolerierung und deren Grenze	29
2.3.1	Historie und Struktur der ISO GPS Normen	30
2.3.2	Erläuterung der Grundlagen von Bezügen und Tolerierungen	30
2.3.3	Mathematische Analyse und Anwendung in der Messtechnik	31
2.3.4	Umsetzungen der internationalen Toleranznormen im CAD	31
3	Aufgabenstellung, Zielsetzung und Ansatz	32
3.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	32
3.2	Ansatz	34
4	Systematik zum Aufbau eines Einzelbezugs	39
4.1	Ebene als Bezug	39
4.1.1	Bezug aus einer Fläche	39
4.1.2	Bezug aus zwei Flächen	48
4.2	Gerade als Bezug	49
4.2.1	Bezug für eine reale gerade Linie auf einer Fläche	49

4.2.2	Bezug für eine offene gekrümmte Kurve auf einer Fläche	51
4.2.3	Achse als Bezug	52
4.2.4	Bezug für ein Geometrieelement aus vier Linien, einer geschlossenen Kurve und einer gekrümmten Mittellinie	54
4.3	Punkt als Bezug	58
4.3.1	Bezug für einen Punkt auf einer Fläche	58
4.3.2	Bezug für eine Kugel	59
4.4	Bezug für einen Durchbruch	60
4.4.1	Bezug für einen 4-Wege-Durchbruch	61
4.4.2	Bezug für einen 2-Wege-Durchbruch	65
5	Systematik zum Aufbau eines gemeinsamen Bezugs	69
5.1	Ebene - Ebene als gemeinsamer Bezug	69
5.2	Gerade - Gerade als gemeinsamer Bezug	70
5.2.1	Gerade auf einer Ebene - Gerade auf einer Ebene als gemeinsamer Bezug	71
5.2.2	Achse - Achse als gemeinsamer Bezug	73
5.2.3	Gerade auf einer Ebene - Achse als gemeinsamer Bezug	74
5.3	Punkt - Punkt als gemeinsamer Bezug	76
5.3.1	Punkt auf einer Fläche - Punkt auf einer Fläche als gemeinsamer Bezug	77
5.3.2	Mittelpunkt - Mittelpunkt als gemeinsamer Bezug	77
5.3.3	Punkt auf einer Fläche - Mittelpunkt als gemeinsamer Bezug	78
5.4	Kombinationsmöglichkeiten des gemeinsamen Bezugs	79
5.4.1	Kombinationstabelle ohne Bedeutung der Reihenfolge der einzelnen Bezüge	80
5.4.2	Kombinationstabelle mit Bedeutung der Reihenfolge der einzelnen Bezüge	81
6	Aufbau eines Bezugssystems	83
7	Systematik für die Profiltoleranz	86
7.1	Ergänzung und Erweiterung der Definition der Linienprofil-toleranz auf Basis der ISO Standards	86

7.1.1	Reale Kurve als toleriertes Geometrieelement	87
7.1.2	Sehr dünne reale Fläche als toleriertes Geometrieelement	89
7.1.3	Abgeleitete gekrümmte Mittellinie als toleriertes Geometrieelement	91
7.2	Definition der Verbundtoleranz für Linienprofiltoleranz	93
7.2.1	Orstoleranz mit zusätzlicher Richtungstoleranz	93
7.2.2	Orstoleranz mit zusätzlicher Formtoleranz	95
7.2.3	Richtungstoleranz mit zusätzlicher Formtoleranz	95
7.2.4	Orstoleranz mit zusätzlicher Richtungs- und Formtoleranz	96
7.3	Definition der Verbundtoleranz für die Flächenprofiltoleranz	97
7.3.1	Orstoleranz mit zusätzlicher Richtungstoleranz	98
7.3.2	Orstoleranz mit zusätzlicher Formtoleranz	99
7.3.3	Richtungstoleranz mit zusätzlicher Formtoleranz	99
7.3.4	Orstoleranz mit zusätzlicher Richtungs- und Formtoleranz	100
8	Systematik für Positionstoleranz	101
8.1	Ergänzung und Erweiterung der Definition der Positionstoleranz	101
8.1.1	Realer integraler Punkt als toleriertes Geometrieelement	101
8.1.2	Reale integrale Gerade als toleriertes Geometrieelement	103
8.1.3	Reale Ebene als toleriertes Geometrieelement	104
8.1.4	Abgeleiteter Punkt als toleriertes Geometrieelement	105
8.1.5	Abgeleitete Gerade als toleriertes Geometrieelement	108
8.2	Ergänzung und Erweiterung der Definition der Positionstoleranz zur Mustertolerierung	110
8.2.1	Musterspezifikation mit einem Indikator	110
8.2.2	Musterspezifikation mit mehreren Indikatoren	120
8.2.3	Kombinationsmöglichkeiten der Verbundtoleranz einer Musterspezifikation	129
9	Praxisbeispiele	132
9.1	Praxisbeispiele für Bezüge	133

9.1.1	Praxisbeispiele für die Aufbaumethode des Bezugssystems für ein komplexes Bauteil	133
9.1.2	Praxisumsetzung für einen Punkt auf einer Fläche als Bezug	136
9.1.3	Praxisbeispiel für ein Rundloch, ein Langloch und ein Viereckloch als Bezug	137
9.2	Praxisbeispiele für Tolerierungen	140
9.2.1	Praxisumsetzung der neu Definition für eine Verbundtoleranz anhand einer Flächenprofiltoleranz	141
9.2.2	Praxisumsetzung der erweiterten Definition der Linienprofiltoleranz	142
9.2.3	Praxisumsetzung der erweiterten Definition für realen Punkt als toleriertes Geometrieelement	143
9.2.4	Praxisbeispiel für die Positionstoleranz ohne Verwendung eines Durchmessersymbols für ein Loch	146
10	Zusammenfassung und Ausblick	148
11	Literaturverzeichnis	150
12	Anhang	A

0 Abkürzungen und Begriffe

Kurzzeichen	Benennung
ASKF	Locate-sketch-car body-production
ASME	Amerikanische Gesellschaft der Maschinenbauingenieure
BED	Bezugsebenen-definierende-Systeme
CMM	Koordinatenmessgerät
CS	Coordinate System
CZ	Kombinierte Zone
CZR	Kombinierte Zone nur rotatorisch
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIS	Draft international standard
FDIS	Final draft international standard
FMK	Funktionsmaßkonzept
FNV	Flächennormalvektoren
GD&T	Geometrische Dimensionierung und Tolerierung
GE	Geometrieelement
GPS	Geometrische Produktspezifikation
Kfz	Kraftfahrzeug
LM	Locator-map
MCP	Master-control-points
OZ	Offset Zone
PLP	Principal-locating-point
RPS	Referenz-Punkt-System
SIM	Gleichzeitige Anforderung
SZ	Separate Zonen
TED	Theoretisch exaktes Maß
TGE	Toleriertes Geometrieelement
UF	Vereinigtes Geometrieelement
Begriff	Definition
Durchbruch	Das Durchbrechen und das Abtragen von einem Gegenstand, sodass ein Durchgang, ein Loch entsteht
Verbundtoleranz	Zwei oder mehrere Toleranzarten werden unter Anwendung des gleichen Toleranzsymbols für ein TGE verwendet

1 Einleitung

Die ISO Geometrische Produktspezifikation (GPS) ist ein internationaler Standard für die Definitionen der Bezüge, Bemaßungen und Spezifikationen der Geometrieelemente in technischen Zeichnungen. Die ISO GPS Normen beinhalten insgesamt 143 Einzelnormen und werden von 25 Ländern zusammengestellt und abgestimmt [1, 2]. Die ISO GPS Normen sind weltweit gültig und sollen für alle Industriebereiche anwendbar sein. Die GPS Normen stellen den aktuellen Stand der Technik der geometrischen Tolerierungen dar. Sie dokumentieren für viele Bereiche die gesamte Prozesskette von der Erstellung der technischen Zeichnungen über die verarbeitenden Prozesse bis hin zur Prüfung des fertigen Produktes [3, 4]. Gleichzeitig regeln die Normen die Kommunikation zwischen Konstrukteur und Messtechniker und zwischen Unternehmen und Lieferanten. Darüber hinaus gibt es eine wichtige Funktion der ISO GPS Normen: Übertragung von eindeutigen Informationen auf Basis einer technischen Zeichnung für alle beteiligten Bereiche, damit kein Interpretationsraum entsteht. Deshalb können die ISO GPS Normen wie ein internationales Sprachtool angesehen werden, welches für internationale Unternehmen mit weltweiten Produktionsstandorten und zahlreichen Lieferanten von besonderer Bedeutung ist. Daher sind die Normen heutzutage in allen schriftlichen Übereinkünften Standard.

ISO GPS Normen sind ein sehr komplexes System mit vielen verschiedenen Themen aus unterschiedlichen Perspektiven von Geometrieelementen [5, 6, 7]. Jedoch behandeln ISO GPS Normen grundsätzlich nur Bauteile aus dem klassischen Maschinenbau, z.B. gedrehte, gefräste und gewalzte Teile. Die Freiformgeometrie, z.B. Karosseriebauteile oder Turbinenschaufeln, wird in ISO GPS kaum berücksichtigt. Aufgrund dieser Unvollständigkeit, Unklarheit und Komplexität der ISO GPS Normen werden weniger als 10% der gesamten 143 ISO GPS Normen z.B. in der Automobilindustrie, Luftfahrtindustrie und Haushaltsgeräteindustrie verwendet. Zusätzlich existieren innerhalb der ISO GPS Normen Widersprüche zwischen und innerhalb verschiedener Einzelnormen. Einige Definitionen sind in ISO GPS Normen nicht explizit definiert, die Beispiele sind unvollständig und von der Praxisanwendung weit entfernt. Weiterhin wird in den ISO GPS Normen nur die geometrische Spezifikation in 2D Zeichnungen betrachtet, eine funktionsbasierte 3D Toleranzangabe in einem CAD Programm wird nicht berücksichtigt.

Basierend auf dieser unzufrieden stellenden Situation entstand diese Arbeit. Die Untersuchungen und Verbesserungen der ISO GPS Normen bestehen aus zwei logisch aufeinander aufbauenden Teilen: zuerst werden die Bezüge und Bezugssysteme der Geometrielemente und danach die geometrischen Tolerierungen analysiert. Folglich sind die folgenden zwei internationalen ISO GPS Normen für diese Arbeit von besonderer Bedeutung: DIN EN ISO 5459 - Bezüge und Bezugssysteme und DIN EN ISO 1101 - geometrische Tolerierung [8, 9, 10]. Die ASME Y14.5 - Bemaßung und Tolerierung wird ebenfalls analysiert, liegt jedoch nicht im Fokus dieser Arbeit [11], da die für ISO GPS Normen entwickelte Analysemethode ebenfalls für ASME Y14.5 verwendet werden kann.

Ziel der Arbeit ist es, Defizite der ISO GPS Normen zu identifizieren, die Definitionen und Beispiele in ISO GPS Normen zu ergänzen und zu erweitern und eine entsprechende, logisch aufgebaute, vollständige Systematik jeweils für Bezüge und Tolerierungen zu erstellen, damit die ISO GPS Normen in jedem Industriebereich, besonders in der Automobil- und Luftfahrtindustrie, verwenden werden können und keinen Interpretationsspielraum anbieten. Die Inhalte dieser Arbeit werden auf einer theoretischen Ebene analysiert, weswegen diese Arbeit eine rein theoretische Arbeit ist. Da die ISO GPS Normen ständig aktualisiert werden, gelten die Analyse und Forschungen der ISO GPS Normen in dieser Arbeit für die Normen, die vor 15.03.2018 veröffentlicht wurden.

Diese Arbeit ist wie folgt aufgebaut: In Kapitel 2 werden signifikante und in der Praxis am häufigsten verwendete ISO GPS Normen, ASME Y14.5 sowie auch die industriellen Firmennormen mit den entsprechenden Anwendungsfällen vorgestellt. Die Literaturrecherche zeigt die aktuellen Forschungsergebnisse zu dem Stand der Technik der geometrischen Produktspezifikation. Die identifizierten Defizite von ISO GPS Normen werden ebenfalls in Kapitel 2 aufgelistet. Die Aufgabenstellung, die Zielsetzung, das Denkmodell dieser Arbeit, die Lösungsansätze sowie Definitionslücken und Forschungsbedarfe werden in Kapitel 3 beschrieben. In Kapitel 4 bis 6 werden die neue vollständige Systematik mit ergänzten Definitionen zu den Bezügen und Bezugssystemen vorgestellt. Die neue, vollständige Systematik mit erweiterten Definitionen der geometrischen Tolerierungen wird in Kapitel 7 und 8 beschrieben. Die Verifikation und der Nutzen finden sich in Kapitel 9 und die Zusammenfassung und der Ausblick folgen in Kapitel 10.

2 Stand der Technik und Defizite

Dieses Kapitel beschreibt den Stand der Technik aus drei Perspektiven: Stand der Normen, Stand der Firmennormen von Automobil- und Luftfahrtindustrie und Stand der Forschung zu Bezügen und Tolerierungen. Die konkreten Defizite werden dabei parallel analysiert.

2.1 Stand der Normen und Defizite

In Deutschland gibt es keine eigene Toleranznorm für die Definition der Bezüge und Toleranzsymbole. DIN übersetzt die ISO GPS Normen direkt auf Deutsch, ohne die Inhalte zu ändern [12]. Deswegen werden die ISO GPS Normen in Deutschland mit Präfix DIN (EN) ISO benannt [13, 14]. Der Einfachheit halber wird in dieser Arbeit „ISO“ statt „DIN (EN) ISO“ verwendet. In diesem Kapitel werden die beiden internationalen Toleranznormen ISO GPS Normen und ASME Y14.5 vorgestellt. Die ISO 14638 beschreibt das ISO GPS-Matrix Modell. Aus diesem Modell kann die Schlüsselinformation entnommen werden, weshalb nach dieser Verteilung der Einzelnormen die ISO GPS Normen nicht vollständig sind. ISO 5459 und ISO 1101 gehören zu den wichtigsten ISO GPS Normen. Unter ISO 1101 sind die Profiltoleranz aus ISO 1660 und die Positionstoleranz aus ISO 5458 von besonderer Bedeutung, da diese Toleranzsymbole die restlichen 11 Toleranzsymbole ersetzen können [15, 16, 17, 18]. Bei ASME gibt es keine separaten Normen für Bezüge und Tolerierungen. Tabelle 1 zeigt den Überblick dieser Normen:

Toleranznormen	Literaturverzeichnis	Titel	Defizite in Kapitel
ISO 14368	[7]	GPS-Matrix-Modell	2.1.1
ISO 5459	[8, 9, 19]	Bezüge und Bezugssysteme	2.1.2
ISO 1101	[10]	Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf	2.1.3, 2.1.4
ISO 1660	[15]	Profiltolerierung	2.1.3
ISO 5458	[16, 17, 20]	Positions- und Mustertolerierung	2.1.4
ASME Y14.5	[11, 21]	Bemaßung und Tolerierung - Technische Zeichnung und Dokumentationspraktiken	2.1.5 und analog zu ISO GPS Norm

Tabelle 1 Wichtigste Toleranznormen für Definition von Bezüge und Toleranzsymbolen

2.1.1 ISO 14368: Stand der Technik und Defizite

ISO 14638 [7] erläutert das Konzept der ISO GPS und enthält ein GPS-Matrix-Modell. ISO beschreibt die Beziehung zwischen den einzelnen Normen. Die Matrix ist eine Tabelle (siehe Anhang Tabelle 14 und Tabelle 15), die zur Beschreibung bestimmter Merkmale von Werkstücken dient. Die Merkmale betreffen einige der verschiedenen Phasen des Lebenszyklus eines Werkstückes (Konstruktion, Herstellung, Prüfung usw.) [7].

Die ausführliche Matrix weist darauf hin, dass die ISO GPS Normen nach der Verteilung vollständig sind und alle Bereiche abgedeckt werden können. Jedoch werden die Beispiele in ISO nicht systematisch ausgewählt und ISO hat keine Matrix zur Verteilung von Geometrieelementen (Abkürzung GE) aus Situationselement (Punkt, Gerade, Ebene oder Schraubenlinie) erstellt [8, 9, 19]. Dies ist eine andere Perspektive, um ein vollständiges ISO GPS System abzusichern. Bild 1 zeigt die ausführliche Unterteilung der GE aus Situationselement. Diese Unterteilung enthält alle Arten von GE und ist vollständig.

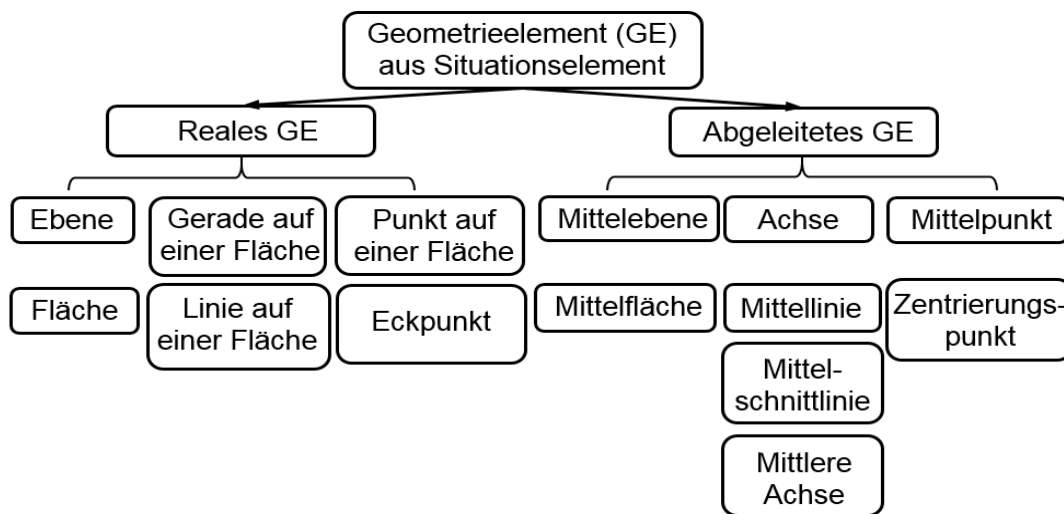


Bild 1 Unterteilung des realen und abgeleiteten GE aus Situationselement

Diese Perspektive ist besonders wichtig für diese Arbeit, da die ISO GPS Normen an GE denken und mit diesen gearbeitet wird. Deswegen werden alle in dieser Arbeit neu entwickelten Systematiken zu Bezügen und Tolerierungen auf Basis des GE-Denkmodells erstellt. Aus diesem Grund kann das Defizit der gesamten ISO GPS Normen wie folgt formuliert werden. Der entsprechende Lösungsansatz befindet sich in Kapitel 3.2.

Defizit: Die ISO GPS Normen sind nach den geometrischen Merkmalen in verschiedene Phasen des Lebenszyklus, nicht nach der Art von Geometrieelementen, unterteilt. Für die ISO bestehen Bauteile ausschließlich aus Flächen. In der Praxis werden Flächen, zum Teil aus Funktions- oder Verifikationsgründen, lediglich als Linie bzw. Punkt betrachtet. Aus diesem Grund kann die Vollständigkeit der ISO GPS Normen nicht gewährleistet werden.

2.1.2 ISO 5459: Stand der Technik und Defizite

Ein Bezug wird von einem oder mehreren Bezugselementen gebildet. Das Bezugselement stammt aus dem GE. Auf Basis der gezeigten Unterteilung (Bild 1) wird die folgende Unterteilung von Bezugselement nach Herkunft des Bezugselements (Bild 2) erstellt. Die Graubereiche bedeuten, dass die in ISO 5459 bereits definierten GE als Bezugselement gelten. Die Skala der Graubereiche wird auf Basis der bereits in ISO 5459 definierten Bezugselemente festgelegt. Die Weißbereiche symbolisieren den Handlungsbedarf von der Art des GE, welches als Bezugselement betrachtet werden soll. Daraus ergibt sich das Hauptdefizit von ISO 5459.

Hauptdefizit: ISO 5459 betrachtet nicht alle Arten eines Geometrieelements als Bezugselement. Das verursacht die Unvollständigkeit der ISO 5459.

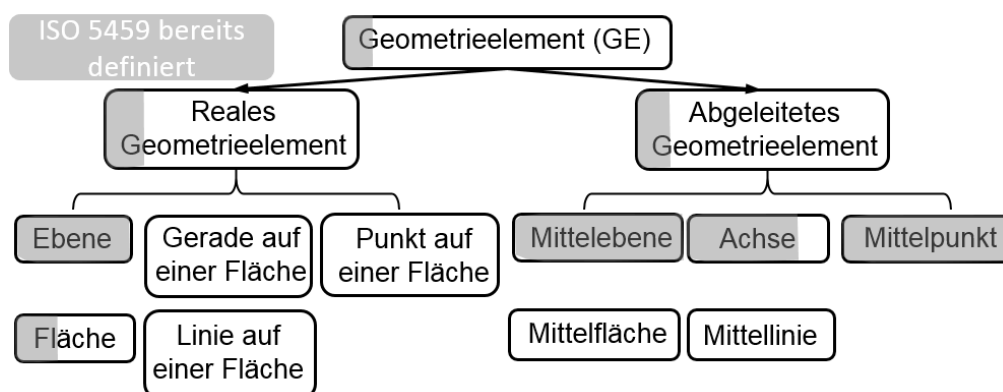


Bild 2 ISO 5459 bereits definiertes GE als Bezugselement

Ein Bezug kann in Einzelbezug und gemeinsamer Bezug unterteilt werden. Daher entstehen die folgenden Unterkapitel.

2.1.2.1 Einzelbezug: Ebene, Gerade und Punkt

Ein Bezug ist eine theoretisch-exakte Sollgeometrie. Er wird durch eine Ebene, eine Gerade, einen Punkt oder eine Kombination aus diesen definiert [8, 9, 19].

Ebene als Bezug:

Eine Bezugsebene kann aus einer gesamten Ebene, einem Teil einer Ebene oder einer Fläche entstehen. ISO 5459 hat nur den Bezug aus einer gesamten Ebene explizit definiert, jedoch hat ISO den Bezug aus einem Teil der Ebene (Bild 3), aus einer gesamten Freiformfläche (Bild 4) und einem Teil (Bild 5) einer Freiformfläche nicht eindeutig definiert. Bild 3 zeigt ein Beispiel aus ISO 5459. Die primäre Bezugsebene ist die Mittelebene von Ebene A und D. Jedoch kann keine Ebene A aus zwei Bezugsstellen A1 und A2 gebildet werden. Die Ebene D kann ebenfalls nicht aus nur einer Bezugsstelle D1 gebildet werden.

Defizit: ISO 5459 hat den Aufbau einer Bezugsebene aus Bezugsstellen, welche Teil der zwei parallelen versetzten Ebenen sind, nicht beschrieben.

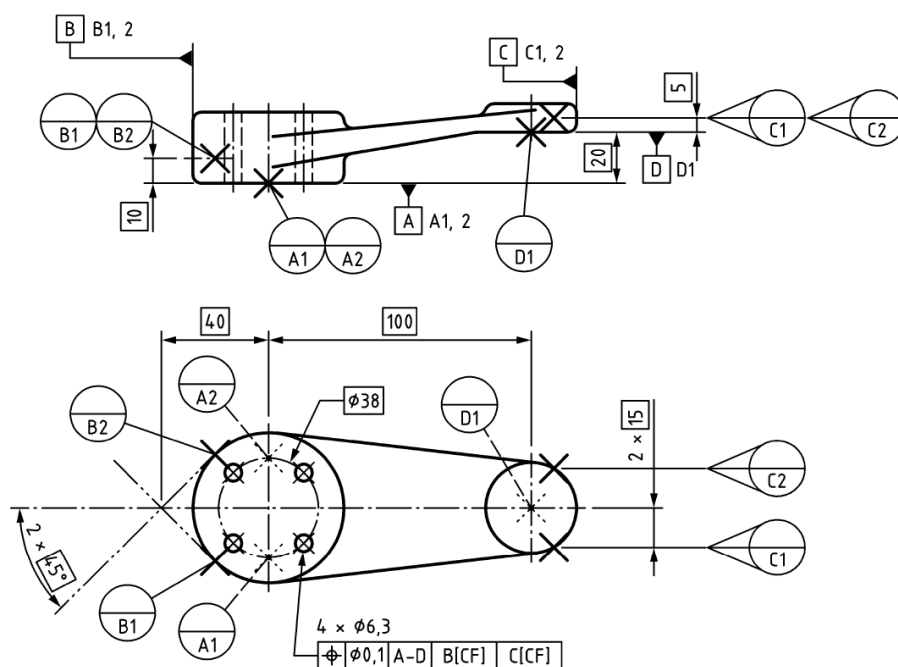


Bild 3 ISO Beispiel: Aufbau der Bezugsebene A-D [8].

In ISO 5459 ist der Bezug für eine Freiformfläche nicht eindeutig definiert. Bild 4 zeigt ein Beispiel aus ISO. Das Bezugssymbol A ist auf der gesamten Freiformfläche gekennzeichnet. Die Bezüge sind nach ISO 5459 eine Ebene, eine Gerade und ein Punkt. Die Vorgehensweise, wie die drei Bezüge von einer Freiformfläche gebildet werden, ist in ISO 5459 nicht erklärt. Daraus ergibt sich folgendes Defizit.

Defizit: Die Definition des Aufbauprozesses eines Bezugs von einer gesamten Freiformfläche nach ISO 5459 ist unklar definiert. Der Aufbauprozess ist nicht nachvollziehbar.

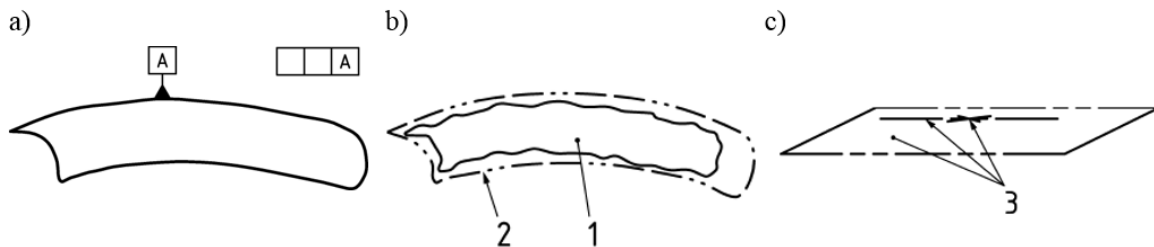


Bild 4 Aufbau eines Bezugs einer Freiformfläche nach ISO 5459 [8]. a) Zeichnungsangabe, b) Legende 1: Bezugselement, 2: assoziiertes GE, c) 3: Bezüge: Ebene, Gerade und Punkt

Eine andere Definitionsunklarheit bei ISO 5459 ist der Aufbau einer Bezugsebene aus einem Teil der Freiformfläche. Bild 5 zeigt das Beispiel aus ISO 5459. Drei Bezugsstellen A1, A2 und A3 sind auf einer Freiformfläche gekennzeichnet und zum Bezug A zusammengefasst. Jedoch gibt es keine Erläuterung dazu, was dieser Bezug A bedeutet und wie dieser aufgebaut wird [22]. Die Theorie aus Bild 4 ist, dass die Bezüge für eine Freiformgeometrie aus einer Ebene, einer Geraden und einem Punkt bestehen. Daher besteht das alternative Verständnis der Bezüge für das Bauteil im Bild 5 aus drei Ebenen, drei Geraden und drei Punkten. Nach diesem Verständnis ist das Bauteil überdimensioniert. Dies funktioniert in der Praxis nicht. Daher existieren weitere Defizite.

Defizit: 1. Auf Basis der ISO 5459 ist der Aufbau einer Bezugsebene aus drei Bezugsstellen von einer Freiformfläche unklar definiert.
2. Alternative: Auf Basis des ISO Beispiels (Bild 4) ist das Bauteil überdimensioniert.

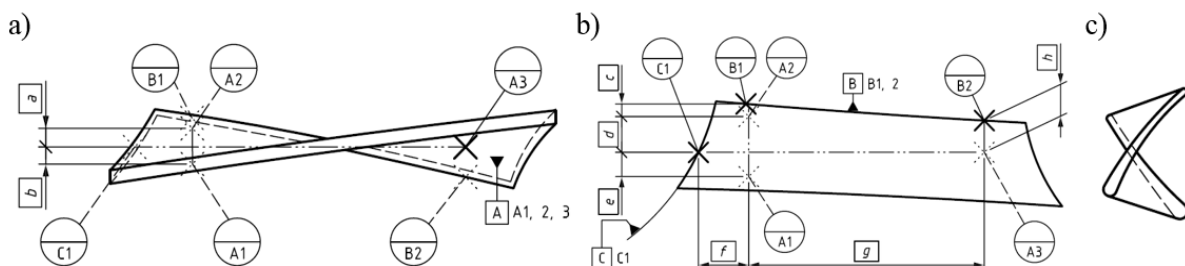


Bild 5 Aufbau eines Bezugs A von Freiformfläche nach ISO 5459 [8]. a) Seitenansicht der Freiformfläche mit Bezugsstellen A1, A2 und A3, b) Draufsicht, c) Rückansicht

Aus den vorangegebenen Definitionsunklarheiten kann ISO 5459 ebenfalls den Bezug aus zwei parallel versetzten Freiformflächen nicht explizit definieren. Bild 6a zeigt die Bezugsebene A, welche die Mittelebene der oberen und unteren Ebene ist. Sind die Bezugselemente zwei Freiformflächen (Bild 6), gibt es hierfür in ISO 5459 keine klare Definition.

Defizit: In ISO 5459 gibt es keine klare Definition für einen Bezug aus zwei Freiformflächen.

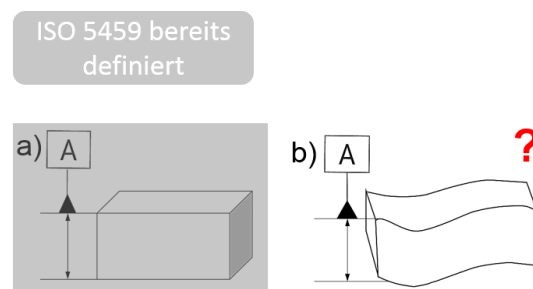


Bild 6 Aufbau einer Ebene als Bezug aus zwei Ebenen oder Flächen [8]

Der entsprechende Lösungsansatz zum Bezug für eine Ebene befindet sich in Kapitel 4.1

Gerade als Bezug:

In ISO 5459 wird nur eine Achse (abgeleitete Gerade) als Bezugsgerade definiert [23-28]. Die restlichen Arten eines GE sind: eine Gerade auf einer Fläche, sowie eine Mittellinie (siehe Bild 2), die in ISO nicht explizit dargestellt werden. Es gibt zwei Methoden, um die Achse als Bezug in ISO als 2D Zeichnung zu kennzeichnen: Entweder mit nur einem Bezugssymbol, welches mit Hilfe einer Doppelpfeil-Maßlinie [29, 30, 31] gekennzeichnet wird, oder mit fixierten linienförmigen Bezugsstellen (Bild 7). Jedoch funktioniert die ISO Theorie mit der fixierten Bezugsstelle nicht, da es in der Praxis kein ideales Bauteil gibt. Das reale Bauteil ist, im Vergleich zur Zeichnung, entweder zu groß oder zu klein. Wenn das reale Bauteil mit den fixierten Bezugsstellen aufgenommen wird, wird das Bauteil in den Raum, welcher durch die fixierten Bezugsstellen erzeugt wurde, nicht hineinpassen. Dies ist ein weiteres Defizit. Die Bezugsachse kann ebenfalls in einem 3D CAD Programm gekennzeichnet werden, jedoch ist die Zeichnungsregel in ISO 5459 und ISO 16792 [32] nicht funktionsbasiert definiert. Nach der ISO Zeichnungsregel [33-36] darf das Bezugssymbol nur an einer realen Bauteiloberfläche gekennzeichnet werden. Wenn der Durchmesser oder die Position des Zylinders geändert wird, dann wird sich die Position des Bezugssymbols nicht automatisch mitändern. Das ist im CAD

Programm nicht updatestabil. Daher können die beschriebenen Defizite wie folgt zusammengefasst werden:

Defizit:

1. In ISO 5459 wird nur die Achse als Bezugsgerade definiert, die restlichen Arten von Bezugselementen werden nicht berücksichtigt.
2. Die Aufnahme der Bezugsachse mit fixierten Bezugsstellen funktioniert nicht.
3. Es fehlt eine funktionsbasierte Zeichnungsregel für das 3D CAD Programm.

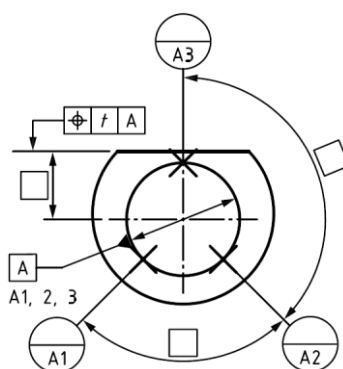


Bild 7 ISO Beispiel mit fixierten linienförmigen Bezugsstellen für die Aufnahme eines Zylinders [8, 9]

Der entsprechende Lösungsansatz zum Bezug für eine Gerade befindet sich in Kapitel 4.2

Punkt als Bezug:

In ISO 5459 wird nur der Mittelpunkt einer Kugel (abgeleitetes GE) als Bezugspunkt definiert. Die restlichen Arten von GE, Punkt auf einer Fläche und Zentrierungspunkt (siehe Bild 2), werden in ISO nicht berücksichtigt.

Defizit: In ISO 5459 wird nur ein Mittelpunkt als Bezugspunkt definiert, die restlichen Arten von Bezugselementen werden nicht berücksichtigt.

Der entsprechende Lösungsansatz zum Bezug für einen Punkt befindet sich in Kapitel 4.3

Bezug für Durchbruch:

Durchbruch bedeutet das Durchbrechen und das Abtragen von einem Gegenstand, sodass ein Durchgang, ein Loch entsteht [37, 38]. In ISO gibt es keine Definition von einem Loch, deswegen wird in dieser Arbeit der Begriff „Durchbruch“, welcher eine sehr dünne Materialwanddicke besitzt, verwendet [39, 40]. In ISO 5459 gibt es keine Definition,

Kennzeichnungsweise oder Beispiel, wie ein Bezug für einen Durchbruch gekennzeichnet und aufgebaut werden soll. Dies stellt eine Definitionslücke dar. Der entsprechende Lösungsansatz befindet sich in Kapitel 4.4

Defizit: In ISO 5459 wird nicht definiert, wie ein Bezug für einen Durchbruch gekennzeichnet und aufgebaut werden soll. Dies ist eine Definitionslücke.

2.1.2.2 Gemeinsamer Bezug: Ebene-Ebene, Gerade-Gerade und Punkt-Punkt

Auf Basis von ISO 5459 wird ein gemeinsamer Bezug aus zwei oder mehreren Bezugselementen gebildet, welche gleichzeitig und ohne spezielle Reihenfolge in Betracht gezogen werden. Um einen gemeinsamen Bezug festzulegen, ist es notwendig, die erzeugten Kollektionsflächen zu betrachten [8]. Kollektionsflächen sind zwei oder mehrere Flächen, welche gemeinsam als eine einzelne Fläche aufgefasst werden [8]. Nach der Art von Bezug kann in Ebene-Ebene, Gerade-Gerade und Punkt-Punkt unterteilt werden. Diese Logik existiert in ISO 5459 nicht.

Ebene-Ebene als gemeinsamer Bezug:

Bild 8 zeigt ein Beispiel aus ISO 5459. A und B sind die einzelnen Bezugsebenen. Ihr gemeinsamer Bezug A-B ist die Halbierungsebene (Legende 3). Nach ISO hat die Schreibweise A-B dieselbe Bedeutung wie B-A. Es gibt in ISO 5459 nur ein Beispiel mit parallelen Ebenen zum Aufbau des gemeinsamen Bezugs. Für den Fall, dass die einzelnen Bezugsebenen senkrecht oder schräg zueinander stehen, gibt es keine Definition. Dies ist ein Defizit. Die Richtigkeit der Definition in ISO, nämlich dass die Reihenfolge der einzelnen Bezüge irrelevant für den Aufbau des gemeinsamen Bezugs ist, wird nicht überprüft. Die Richtigkeit des ISO-Denkmodells bezüglich der Notwendigkeit des Aufbaus der Kollektionsfläche wird ebenfalls nicht überprüft. Diese zwei Überprüfungen werden in Kapitel 5 durchgeführt. Die Defizite von ISO können wie folgt zusammengefasst werden:

Defizit:

1. Es fehlt eine komplette Systematik zum Aufbau des gemeinsamen Bezugs für zwei oder mehrere Ebenen mit unterschiedlicher Orientierung.
2. Es gibt keine Erklärung zu der Richtigkeit der Reihenfolge der einzelnen Bezüge.
3. Es gibt keine Erklärung zu der Richtigkeit und der Notwendigkeit des Aufbaus der Kollektionsfläche für den gemeinsamen Bezug

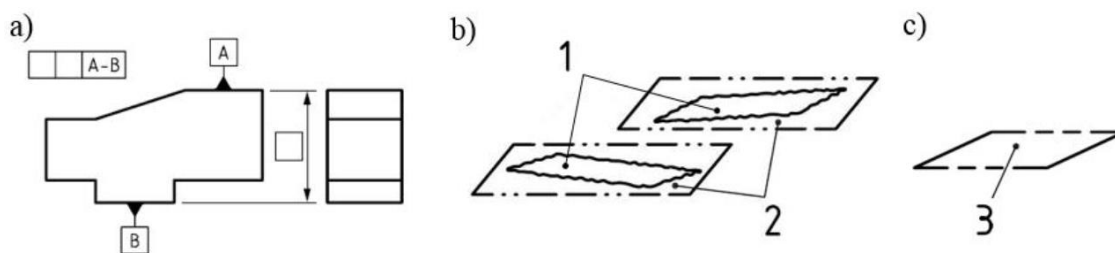


Bild 8 ISO Beispiel. a) Zeichnungsangabe, b) Legende 1: Bezugselemente, Legende 2: assoziierte GE c) Legende 3: gemeinsamer Bezug [8, 9]

Der entsprechende Lösungsansatz zum gemeinsamen Bezug für Ebene-Ebene befindet sich in Kapitel 5.1.

Gerade-Gerade als gemeinsamer Bezug:

Aus dem vorangegangenen Kapitel 2.1.2.1 ist die Bezugsgerade in ISO lediglich als Achse definiert. Daher wird der gemeinsame Bezug von Gerade-Gerade in ISO nur als „Achse-Achse“ definiert. Für die andere Art der Bezugselemente (z.B. Gerade auf einer Fläche) gibt es keine Definition. Theoretisch existiert ein gemeinsamer Bezug aus verschiedenen Arten von GE, z.B. Achse-Gerade auf einer Fläche. Dies ist in ISO nicht definiert. Bild 9 zeigt ein Beispiel aus ISO 5459. A und B sind die einzelnen Bezugsachsen. Ihr gemeinsamer Bezug A-B sind die Situationselemente der Kollektionsfläche: eine Ebene und eine Gerade (Legende 3). Die Ebene enthält die beiden Achsen A und B und die Gerade ist die Mittellinie der beiden Achsen. Dies widerspricht der ISO-Definition einer Kollektionsfläche, da das Situationselement der Kollektionsfläche nur eine Ebene sein darf. Das ist ein weiteres Defizit von ISO.

Defizit:

1. Nicht alle Arten von GE werden in ISO 5459 zum Aufbau des gemeinsamen Bezugs berücksichtigt.
2. Ein gemeinsamer Bezug aus gemischten GE wird in ISO 5459 nicht berücksichtigt.
3. Definitionswiderspruch in ISO 5459 zwischen der Definition von Kollektionsfläche und dem Beispiel in Bild 9.

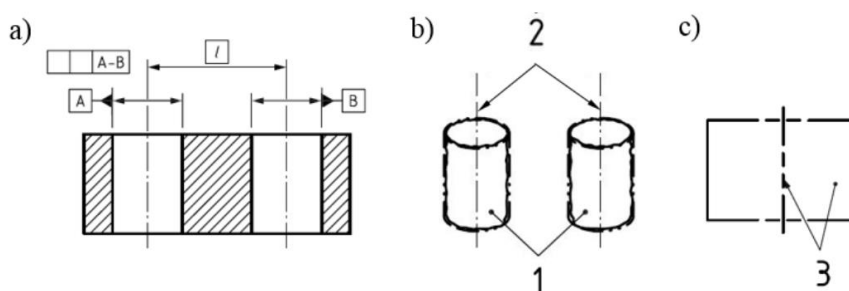


Bild 9 ISO Beispiel. a) Zeichnungsangabe, b) Legende 1: Bezugselemente, Legende 2: assoziierte GE, c) Legende 3: gemeinsamer Bezug [8, 9]

Der entsprechende Lösungsansatz zum gemeinsamen Bezug für Gerade-Gerade befindet sich in Kapitel 5.2

Punkt-Punkt als gemeinsamer Bezug:

Aus dem vorangegangenen Kapitel 2.1.2.1 ist nur der Mittelpunkt einer Kugel als Bezugspunkt in ISO definiert. Daher wird der gemeinsame Bezug von Punkt-Punkt in ISO nur als „Mittelpunkt-Mittelpunkt“ definiert. Jedoch gibt es kein entsprechendes Beispiel in ISO 5459. Die andere Art von Punkt, z.B. Punkt auf einer Fläche, wird in ISO nicht berücksichtigt. Der entsprechende Lösungsansatz zum gemeinsamen Bezug für Punkt-Punkt befindet sich in Kapitel 5.3.

Gemischter, gemeinsamer Bezug aus unterschiedlichen Arten der GE:

Defizit: In ISO 5459 werden nur gleiche GE betrachtet, z.B.: Ebene-Ebene, Gerade-Gerade, und Punkt-Punkt. Ein gemeinsamer Bezug mit gemischten GE, wie beispielsweise Ebene-Gerade, Gerade-Punkt oder Punkt-Ebene wird in ISO 5459 nicht betrachtet. Das zeigt die Unvollständigkeit des ISO GPS Systems.

Der entsprechende Lösungsansatz befindet sich in Kapitel 5.4.

2.1.2.3 Methode zum Aufbau eines Bezugssystems

Auf Basis von ISO 5459 wird ein Bezugssystem durch eine geordnete Anordnung von zwei oder drei Bezügen gebildet [8]. Es wird zwischen primärem, sekundärem und tertiärem Bezug unterschieden. Der primäre Bezug führt Nebenbedingungen der Richtung des sekundären und tertiären Bezugs ein; der sekundäre Bezug führt Nebenbedingungen der Richtung des tertiären Bezugs ein. Der primäre Bezug legt dem sekundären Bezug Nebenbedingungen der Richtung auf. Wenn ein tertiärer Bezug vorhanden ist, legt der primäre Bezug dem tertiären Bezug

Nebenbedingungen der Richtung auf. Der sekundäre Bezug legt dem tertiären Bezug Nebenbedingungen der Richtung auf. Diese Nebenbedingungen sind entweder explizit durch theoretisch-exakte Maße oder implizit (implizite Nebenbedingung der Richtung: 0° , 90° , 180° , 270° und implizite Nebenbedingung des Ortes: 0 mm) festgelegt [8].

Die Theorie für den Aufbau des Bezugssystems wird von ISO 5459 abgeleitet: Um ein Bezugssystem aufzubauen, soll zuerst immer der primäre Bezug festgelegt werden. Der sekundäre und tertiäre Bezug sollen senkrecht oder parallel zu dem primären Bezug orientiert werden. Bild 10 zeigt zwei Beispiele, um die ISO Theorie zu veranschaulichen. Bild 10a zeigt, dass die sekundäre Bezugsachse A und tertiäre Bezugsachse B parallel zueinander und senkrecht zu der primären Bezugsebene C sind. Bild 10b zeigt, dass die sekundäre Bezugsachse A und tertiäre Bezugsachse B gemäß der Nebenbedingung der Richtung senkrecht zu C orientiert werden. Von daher ist es für den Aufbau des Bezugssystems wichtig, dass der primäre Bezug immer zuerst festgelegt wird.

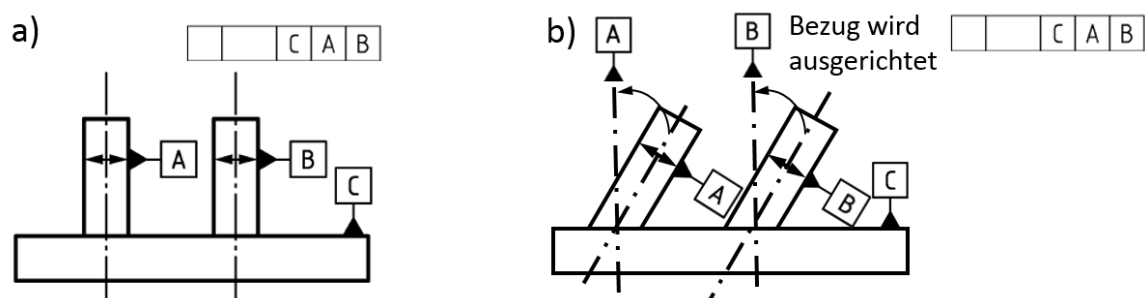


Bild 10 a) ISO Beispiel [10], b) Bauteil mit zwei Zylindern schräg zu einer Ebene [4]

2.1.3 ISO 1101 und ISO 1660: Stand der Technik und Defizite

Nach der Beschreibung der Bezüge kann nun die Tolerierung der GE zu den Bezügen in Relation gesetzt werden. ISO 1101 [10] beschreibt die Definitionen und Anwendungen aller 14 Toleranzsymbole für GE in Zeichnungen [41, 42, 43]. Wenn keine Toleranzen angegeben sind, dann gelten teilweise die Allgemeintoleranzen nach Normen [44-48]. Es gibt insgesamt 4 Toleranzarten: Form- Richtungs-, Orts- und Lauftoleranz. Da die Lauftoleranz in ISO 1101 eindeutig definiert ist, wird sie in dieser Arbeit nicht mehr weiter analysiert. Die Toleranzsymbole der Ebenheit [49] und Zylindrizität können durch die Flächenprofiltoleranz ohne Bezug ausgedrückt werden. Rechtwinkligkeit, Parallelität und Neigung können durch Positionstoleranz und Flächenprofiltoleranz mit Bezug ausgedrückt werden. Konzentrität, Koaxialität, Symmetrie und Geradheit [50] können durch Positionstoleranz beschrieben

werden. Lauf, Geradheit und Rundheit [51] können durch Linienprofiltoleranz ausgedrückt werden. Gesamtlauf kann durch Flächenprofiltoleranz beschrieben werden. Daher können die drei wichtigen Toleranzsymbole Positions-, Linienprofil- und Flächenprofiltoleranzsymbol die restlichen 11 Toleranzsymbole ersetzen. Deshalb wird nur auf diese eingegangen.

ISO 1660 [15] enthält die Regeln, Definitionen und Anwendungen der Linien- und Flächenprofiltoleranz für geometrische Tolerierung bei GE (Linien und Flächen). Diese Norm ist eine erweiterte Norm von ISO 1101. Die Definition von Flächenprofiltoleranz ist in ISO, im Gegensatz zur Linienprofiltoleranz, eindeutig und vollständig beschrieben. Bild 11 stellt das gesamte tolerierte GE (Abkürzung TGE) [52] für Linienprofiltoleranz dar. Diese Struktur ist nach der Herkunft des TGE erstellt. Die Skala der Graubereiche wird auf Basis der bereits definierten Definition und Anwendungsfälle in ISO 1101 und ISO 1660 festgelegt. Die Weißbereiche stellen Handlungsbedarf dar. ISO 1101 und ISO 1660 haben nicht alle Arten der TGE berücksichtigt, daher entsteht ein Defizit:

Defizit: Die in ISO 1101 und ISO 1660 definierte Linienprofiltoleranz hat nicht alle Arten der tolerierten Geometrielemente berücksichtigt

Der entsprechende Lösungsansatz zur Ergänzung und Erweiterung der Definitionen der Linienprofiltoleranz befindet sich in Kapitel 7.1.

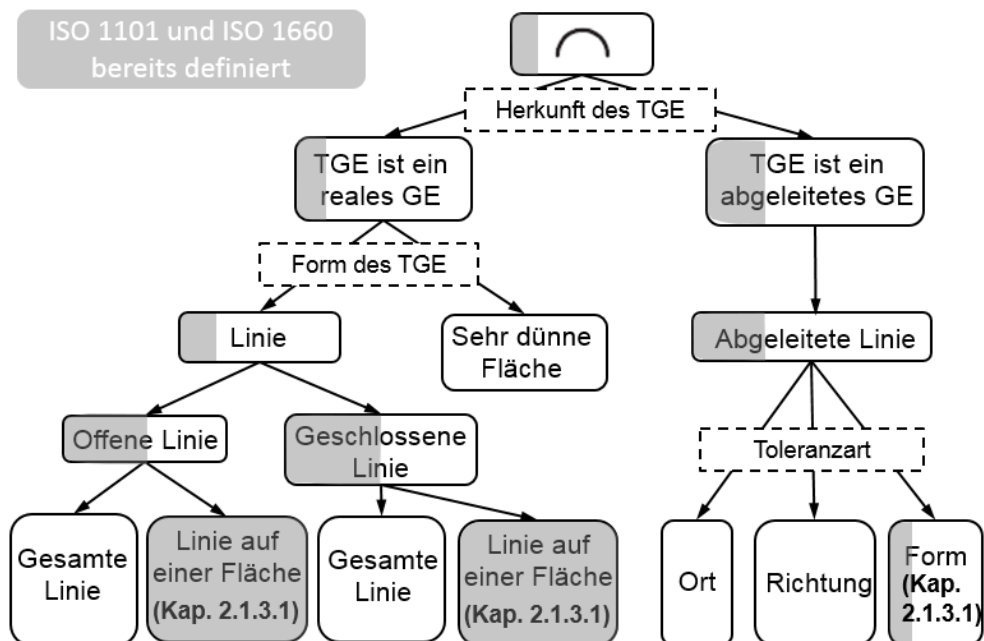


Bild 11 Linienprofiltoleranz: Unterteilung ihres tolerierten GE (TGE) nach seiner Herkunft

2.1.3.1 Definition von Linienprofilltoleranz

Nach ISO 1101 und ISO 1660 kann die Linienprofilltoleranz eine gekrümmte, reale, integrale Linie (Bild 12) und eine abgeleitete Linie (Bild 13) tolerieren. Die reale, integrale Linie ist Teil eines GE, welche durch einen Schnittebene-Indikator aus einer Fläche extrahiert wird. Das TGE beschreibt lediglich die Schnittlinie (Bild 12a). Wenn der Toleranzindikator mit dem Modifikator UF (United Feature) und Rundum-Symbol gekennzeichnet ist [10], dann ist das TGE die geschlossene Linie aus den gesamten Flächen (Bild 12c). Die Toleranzzone ist ein Kreis, welcher sich entlang des TGE bewegt (Bild 12b).

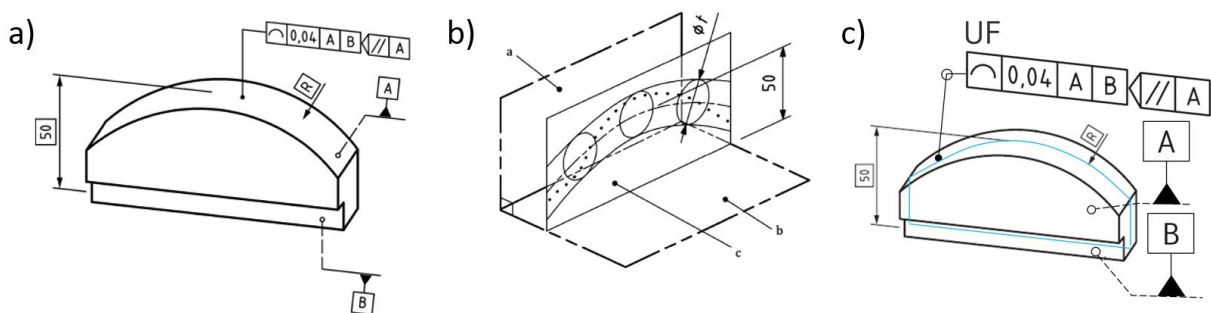


Bild 12 ISO Beispiel von Linienprofilltoleranz [10]. a) Zeichnungsangaben, b) Definition der Toleranzzone, c) Zeichnungsangaben [10, 15].

Bild 13 zeigt die andere ISO Definition von Linienprofilltoleranz für die Formtoleranz von einer abgeleiteten gekrümmten Linie. Die Toleranzzone ist ein massives Rohr, in welchem sich eine Kugel mit Durchmesser 0,5 mm entlang der theoretisch-exakten Mittellinie bewegt [15].

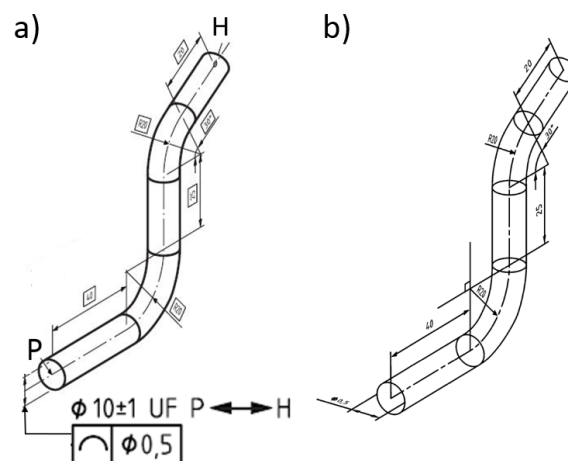


Bild 13 Definition der Linienprofilltoleranz für eine abgeleitete Linie aus ISO 1660 [15]. a) Zeichnungsangabe, b) Toleranzzone [15]

Mit diesen zwei ISO Definitionen von Linienprofilltoleranz können nicht alle Arten von Linien toleriert werden. Der entsprechende Lösungsansatz befindet sich in Kapitel 7.1.

2.1.3.2 Verbundtoleranz für Linien- und Flächenprofilltoleranz

Es gibt in den ISO GPS Normen keine Definition für Verbundtoleranz. In ISO 1101, wenn für zwei oder mehr Toleranzen dieselben Merkmale anzugeben sind, dürfen diese kombiniert dargestellt werden [10, 53]. Es gibt keinen Unterschied zwischen der einzelnen und der kombinierten Schreibweise von der Toleranz. Dies ist ein großer Unterschied im Vergleich zu ASME Y14.5. In ASME Y14.5 unterscheiden sich zwar die beiden Schreibweisen, jedoch werden die Definitionen und Beispiele der Verbundtoleranz unlogisch aufeinander aufgebaut und sind unvollständig. Je nach Toleranzart gibt es Ort-, Richtung- und Formtoleranz. Wenn zwei oder mehrere Toleranzarten unter Anwendung des gleichen Toleranzsymbols für ein TGE verwendet werden, dann ist die kombinierte Toleranz eine Verbundtoleranz. Nach den mathematischen Kombinationsmöglichkeiten der drei Toleranzarten ergeben sich die folgenden vier Kombinationen: *Ort und Richtung*; *Ort und Form*; *Richtung und Form*; *Ort, Richtung und Form*. Als Beispiel bedeutet die Kombination: Ort, Richtung und Form, dass das TGE den Ort bereits definiert hat, die Richtung und die Form können noch zusätzlich eingeschränkt werden. Die Definition zu Verbundtoleranz fehlt in ISO 1101 und ISO 1660 komplett.

Defizit: In ISO 1101 und ISO 1660 fehlt eine logisch aufeinander aufgebaute Struktur und komplett nachvollziehbare Definition zur Verbundtoleranz für Profilltoleranz

Der entsprechende Lösungsansatz zur Definitionen der Verbundtoleranz für Linien- und Flächenprofilltoleranz befindet sich in Kapitel 7.2 und 7.3.

2.1.4 ISO 1101 und ISO 5458: Stand der Technik und Defizite

ISO 1101 definiert die Definition und Anwendungsfälle der Positionstoleranz für ein toleriertes Geometrieelement (TGE). ISO 5458 definiert zusätzlich die Positionstoleranz für Mustertolerierungen. Daher kann der Stand der Technik für Positionstoleranz in zwei Unterkapitel eingeteilt werden.

2.1.4.1 Definition von Positionstoleranz

Nach ISO 1101 kann die Positionstoleranz ein reales integrales und abgeleitetes GE tolerieren. Bild 14 zeigt die Unterteilung des TGE nach seiner Herkunft. Die Skala der Graubereiche wird auf Basis der bereits definierten Definition und Anwendungsfälle in ISO 1101 festgelegt. Die Weißbereiche stellen Handlungsbedarf dar. Jedoch hat ISO 1101 nicht alle Arten der TGE berücksichtigt, daher entsteht ein Defizit:

Defizit: Die in ISO 1101 definierte Positionstoleranz hat nicht alle Arten der tolerierten Geometrielemente berücksichtigt

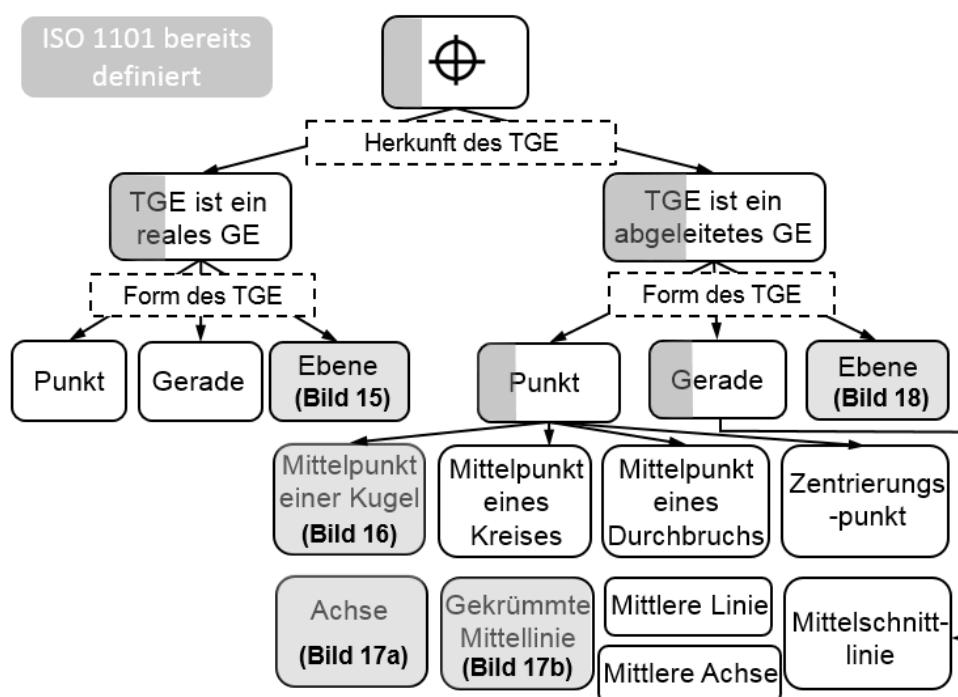


Bild 14 Positionstoleranz: Unterteilung ihres TGE nach seiner Herkunft

Wenn das TGE ein reales GE ist, hat ISO nur die Positionstoleranz für eine Ebene definiert (Bild 15). Die Toleranzzone besteht aus zwei parallelen Ebenen, welche parallel zum TGE mit dem Abstand des Toleranzwerts liegen. Ein Punkt oder eine Gerade auf einer Fläche werden in ISO nicht berücksichtigt.

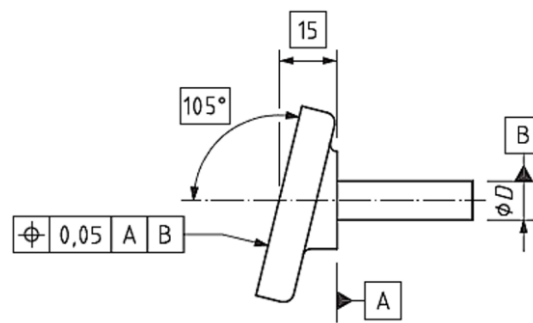


Bild 15 Positionstolerierung einer realen Ebene nach ISO 1101 [10]

Wenn das TGE ein abgeleiteter Punkt ist, hat ISO nur die Positionstoleranz für den Mittelpunkt einer Kugel mit $S\emptyset$ (sphärisches Durchmesserymbol) definiert (Bild 16). Ohne $S\emptyset$ hat ISO nicht definiert. Den anderen abgeleiteten Punkt als TGE, z.B. Mittelpunkt eines Kreises; Mittelpunkt eines Durchbruchs aus einem dünnwandigen Bauteil und Zentrierungspunkt, hat ISO nicht definiert.

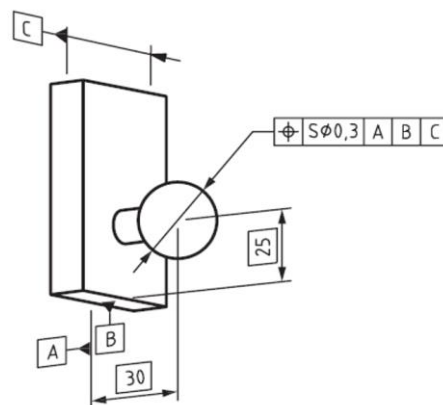


Bild 16 Positionstolerierung eines Mittelpunkts von einer Kugel nach ISO 1101 [10]

Wenn das TGE eine abgeleitete Gerade ist, hat ISO nur die Positionstoleranz für eine Achse und eine Mittellinie mit \emptyset definiert (Bild 17). Bei der Angabe ohne \emptyset ist die Toleranzzone nicht definiert. Die andere Art der abgeleiteten Gerade, z.B. Mittlere Linie, Mittlere Achse und Mittelschnittlinie, wird in ISO nicht definiert. Auf Basis von ISO 1660 kann die Positionstoleranz für eine gekrümmte Mittellinie verwendet werden [15]. Jedoch wird in ISO 1101 beschrieben, dass die Positionstoleranz nur für eine gerade Linie verwendet werden darf. Für eine nicht gerade Line soll die Linienprofilltoleranz verwendet werden [10]. Dies ist ein Definitions widerspruch zwischen den beiden ISO Normen. Die Defizite können wie folgt zusammengefasst werden:

Defizit: Bei der Angabe ohne $S\emptyset$ und ohne \emptyset ist die Toleranzzone für das abgeleitete TGE in den ISO GPS Normen nicht definiert.

Definitionswiderspruch: Nach ISO 1660 darf die Positionstoleranz für eine gekrümmte Mittellinie verwendet werden, jedoch verbietet ISO 1101 diese Anwendung.

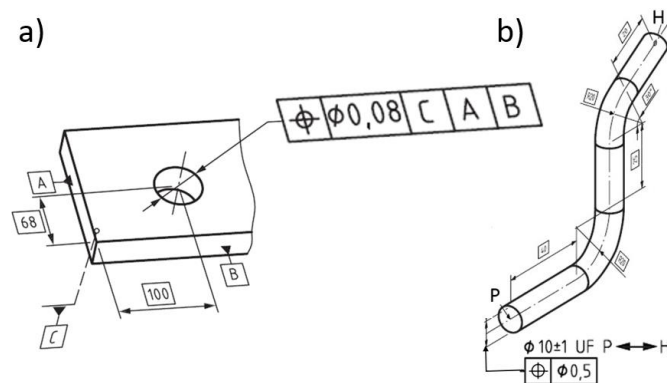


Bild 17 Positionstolerierung einer Achse nach ISO 1101 [10] und einer gekrümmten Mittellinie nach ISO 1660 [15]

Ist das TGE eine abgeleitete Ebene, so ist dies in ISO 1101 eindeutig und vollständig definiert (Bild 18). Die Toleranzzone besteht aus zwei parallelen Ebenen, welche parallel zur Bezugsebene B mit dem Abstand des Toleranzwerts liegen.

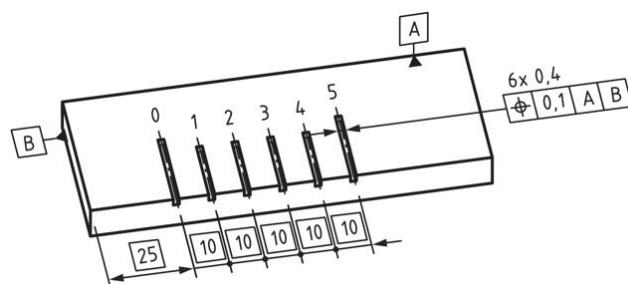


Bild 18 Positionstolerierung einer abgeleiteten Ebene nach ISO 1101 [10]

Der entsprechende Lösungsansatz zur Ergänzung und Erweiterung der Definitionen der Positionstoleranz befindet sich in Kapitel 8.1.

2.1.4.2 Definition von Positionstoleranz für eine Mustertolerierung

Eine andere, wichtige Funktion der Positionstoleranz ist die Spezifizierung der Mustertolerierung. ISO 5458 beschreibt die Definition, Regel und Anwendungsfälle der Positionstoleranz für Mustertolerierung. Die gültige ISO 5458 [16] ist aus dem Jahr 1999 und

beinhaltet insgesamt 11 Seiten. Nach 17 Jahren wurde ihr aktueller Entwurf ISO/DIS 5458 [17] veröffentlicht und beinhaltet insgesamt 36 Seiten. Der finale Entwurf ISO/FDIS 5458 [20] wurde im November 2017 veröffentlicht und besteht aus insgesamt 44 Seiten. Die FDIS darf normalerweise nur Grammatik (keine Inhalte) ändern, bis die neue, gültige Norm veröffentlicht wird. Es gibt wesentliche inhaltliche Unterschiede nicht nur zwischen der gültigen Norm und den neuen Entwürfen, sondern auch zwischen den DIS und FDIS. Die signifikanten Unterschiede werden in diesem Kapitel beschrieben. Die Inhalte des aktuellen ISO/FDIS sind im Vergleich zur gültigen ISO vervierfacht. Der Grund liegt darin, dass die ca. 200 Experten im ISO/TC 213 ihre persönlichen Erfahrungen in ISO 5458 mit einbringen möchten. Deswegen häufen sich die Beispiele. Im Resultat wird die ISO 5458 so zu einer Beispielsammlung, jedoch fehlt eine grundsätzliche, logisch aufeinander aufgebaute Systematik für die Mustertolerierung.

Defizit: In ISO 5458 und in deren Entwürfen fehlt eine grundsätzliche, logisch aufeinander aufgebaute Systematik für die Mustertolerierung

Bild 19 zeigt eine Struktur, die die gesamte Systematik der Mustertolerierung mit den in ISO definierten Symbolen und Modifikatoren (ISO/FDIS 5458) nach bestimmten Kriterien unterteilt. Diese logische Struktur gibt es in ISO 5458 und deren Entwürfen nicht. Die Graubereiche sind bereits in ISO/FDIS 5458 definiert. Die Graupunkte in den Weißbereichen bedeuten, dass die Definitionen der Mustertolerierung in dieser Toleranzart zufällig und unvollständig definiert sind. Je nach Anzahl der Indikatoren kann zwischen Musterspezifikation mit einem und mehreren Indikatoren unterschieden werden. Diese wiederum können in eine oder mehrere Musterebenen unterteilt werden. Eine Musterspezifikation mit einem Indikator hat dieselbe Definition wie ein homogenes Muster in ISO/DIS 5458. Eine Musterspezifikation mit mehreren Indikatoren hat dieselbe Definition wie ein nichthomogenes Muster in ISO/DIS 5458. Die TGE sind bei der Musterspezifikation mit einem Indikator alle identisch. Bei der Musterspezifikation mit mehreren Indikatoren sind die TGE nicht alle identisch. Es werden mindestens zwei Toleranzindikatoren benötigt, um alle TGE zu tolerieren. Je nach Toleranzart kann die Mustertolerierung in Orts-, Richtungs- und Formtolerierung unterteilt werden. Nach der Analyse werden nicht alle Toleranzarten von ISO berücksichtigt, weil ISO die Beispiele von Mustertolerierungen zufällig ausgewählt hat und keine Systematik dahinter steckt. Hier entsteht ein weiteres Defizit:

Defizit: Nicht alle Toleranzarten (Orts-, Richtungs- und Formtolerierung) der Mustertolerierung werden von ISO 5458 und deren Entwürfen berücksichtigt.

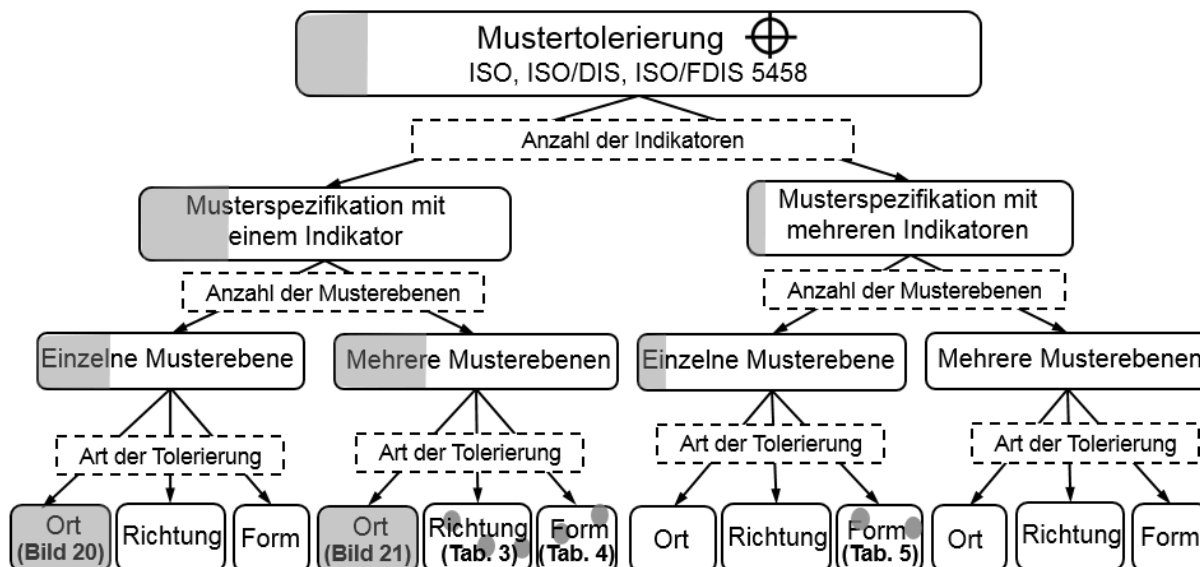


Bild 19 Mustertolerierung: Unterteilung der Systematik nach Anzahl der Indikatoren, Musterebenen und Toleranzart

Um die Definition für Mustertolerierung von ISO 5458 und deren Entwürfe besser zu verstehen, wird eine Übersicht von Modifikatoren CZ, SZ, CRZ und SIM in der Tabelle 2 gezeigt:

Modifikator	Definition	Bedeutung in ISO
CZ	kombinierte Zone	Unveränderlicher Abstand (TED) und Orientierung zwischen TGE
SZ	Separate Zone	Veränderlicher Abstand und Orientierung zwischen TGE
CZR	Kombinierte Zone nur rotatorisch	Veränderlicher Abstand und unveränderliche Orientierung zwischen TGE
SIM	Gleichzeitige Anforderung	Unveränderlicher Abstand (TED) und Orientierung zwischen Arten des TGE

Tabelle 2 Übersicht der Modifikatoren in ISO/DIS 5458 und ISO/FDIS 5458 [17, 20]

Bild 20 zeigt die Ortstolerierung der einzelnen Musterebene bei Musterspezifikation mit einem Indikator. Die TGE sind die vier Achsen aus den vier identischen Bohrungen. Wegen CZ sind die Abstände zwischen den vier theoretisch exakten Achsen unveränderlich. Der

Toleranzindikator kann mit und ohne Angabe des CZ definiert werden [20]. Jedoch gibt es für Richtungs- und Formtolerierung keine explizite Definition in ISO.

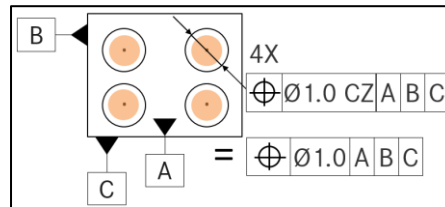


Bild 20 Ortstolerierung der einzelnen Musterebene bei Musterspezifikation mit einem Indikator nach der ISO/FDIS 5458 Definition

Bild 21 stellt ein Beispiel nach der ISO Definition dar. Die vier Bohrungen wurden in zwei Gruppen A unterteilt. In jeder Gruppe gibt es zwei TGE - B. Die Modifikatoren-Kombination „CZ CZ“ bedeutet, dass die Abstände zwischen der jeweiligen Gruppe A und innerhalb des jeweiligen GE- B unveränderlich sind. In diesem Fall kann „CZ CZ“ ohne Veränderung der Bedeutung weggelassen werden [20].

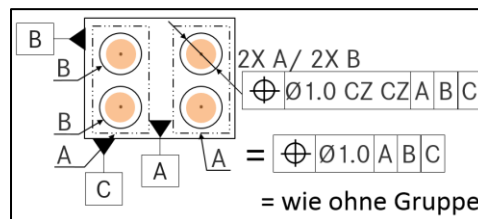


Bild 21 Ortstolerierung mit mehreren Musterebenen bei Musterspezifikation mit einem Indikator nach Definition von ISO/FDIS 5458

Es gibt für Richtungstolerierung mathematisch insgesamt vier Kombinationen von CZ und SZ. Nach Analyse kann CZR nur für die Formtolerierung verwendet werden. Tabelle 3 zeigt die vier konkreten Kombinationsmöglichkeiten. Es gibt große Definitionsunterschiede zwischen DIS und FDIS. CZ SZ hat in DIS die gleiche Definition wie SZ CZ in FDIS. Die FDIS hat die Symbolsprache komplett geändert, dennoch bleiben die Definitionen identisch wie bei DIS. Dies führt zu Verwirrung. Diese Kombinationen in FDIS werden nur allgemein definiert, ohne Erläuterung und ohne Beispiele. Da FDIS die finale Version zum endgültigen ISO Stand übernehmen wird, verfolgt diese Arbeit die Symbolsprache von FDIS. Daher ist das Defizit wie folgt zusammen gefasst:

Defizit: 1. ISO/FDIS 5458 hat die Symbolsprache von CZ SZ und SZ CZ im Vergleich zu ISO/DIS 5458 komplett geändert. Das führt zu Verwirrung.

2. Die Kombinationen in FDIS werden nur allgemein definiert, ohne Erläuterung und ohne Beispiele. Die Richtigkeit der Kombination wird nicht überprüft.

Kombination	ISO/DIS 5458	ISO/FDIS 5458
CZ CZ	✓	✓
CZ SZ	✓	✗ (funktioniert nicht)
SZ CZ	✗ (funktioniert nicht)	✓
SZ SZ	Nicht definiert	✓

Tabelle 3 Kombinationsmöglichkeiten von CZ und SZ bei mehreren Musterebenen mit einem Indikator für Richtungstolerierung [17, 20]

Bei Formtolerierung der Musterspezifikation mit einem Indikator bei mehreren Musterebenen kann CZ, SZ und CZR verwendet werden. In Tabelle 3 und Tabelle 4 sind die kompletten Kombinationsmöglichkeiten der drei Modifikatoren enthalten. CZR wird erst in FDIS hinzugefügt. Jedoch werden die Kombinationen in FDIS ebenfalls nur allgemein definiert, ohne Erläuterung und ohne Beispiele. Die Richtigkeit der Kombination wird ebenfalls nicht überprüft.

Kombination	ISO/DIS 5458	ISO/FDIS 5458
CZR CZR	Nicht definiert	✗ (Bedeutungslos)
CZ CZR		✗ (Bedeutungslos)
CZR CZ		✓
SZ CZR		✓
CZR SZ		✗ (Bedeutungslos)

Tabelle 4 Zusätzliche Kombinationsmöglichkeiten von CZ, SZ und CZR bei mehreren Musterebenen mit einem Indikator für Formtolerierung [20]

Bei der Musterspezifikation mit mehreren Indikatoren haben DIS und FDIS nur die Kombinationsmöglichkeiten der Formtolerierung bei einer einzelnen Musterebene definiert. Alle anderen Fälle sind nicht definiert. Tabelle 5 zeigt die vollständigen Kombinationen. DIS und FDIS haben nur SIM mit gleichem Modifikator definiert, z.B. SIM mit zwei CZ bei zwei Indikatoren. SIM mit zwei gemischten Modifikatoren, z.B. SIM mit CZ und CZR jeweils bei zwei Indikatoren, ist in DIS und FDIS nicht definiert. Dennoch hat ISO ebenfalls die Kombinationen nur allgemein definiert, ohne Erläuterung und ohne Beispiele. Die Richtigkeit der Kombinationen wird ebenfalls nicht überprüft.

Defizit: 1. Die definierten Kombinationen von ISO/DIS 5458 und ISO/FDIS 5458 für die Musterspezifikation mit mehreren Indikatoren sind unvollständig.

2. Die Kombinationen werden nur allgemein definiert, ohne Erläuterung und ohne Beispiele. Die Richtigkeit der Kombination wird nicht überprüft.

Kombination	ISO/DIS 5458	ISO/FDIS 5458
CZ, SIM CZ, SIM	✓	✓
SZ, SIM SZ, SIM	Nicht definiert	Nicht definiert
CZR, SIM CZR, SIM		✗ (keine Erläuterung dazu)
CZ, SIM SZ, SIM		Nicht definiert
SZ, SIM CZ, SIM		
CZ, SIM CZR, SIM		
CZR, SIM CZ, SIM		
SZ, SIM CZR, SIM		
CZR, SIM SZ, SIM		

Tabelle 5 Kombinationstabelle für die Formtolerierung der Musterspezifikation mit mehreren Indikatoren bei einzelner Musterebene [17, 20]

Der entsprechende Lösungsansatz zur Ergänzung und Erweiterung der Definitionen der Positionstoleranz zur Mustertolerierung befindet sich in Kapitel 8.2.

2.1.5 ASME Y14.5: Stand der Technik und Defizite

Der andere bekannte Standard für Bezüge und Tolerierungen ist ASME Y14.5 - Bemaßung und Tolerierung - Technische Zeichnung und Dokumentationspraktiken [11, 21]. Diese Norm wird in der Praxis auch als GD&T (Geometrische Dimensionierung und Tolerierung) bezeichnet. ASME Y14.5 ist im Vergleich mit ISO GPS Normen praxisorientierter, verständlicher und anwendungsfreundlicher. Die Defizite in ASME Y14.5 können analog zu ISO GPS Normen analysiert werden. Die meisten Definitionen von Bezügen und Tolerierungen sind zwischen ASME Y14.5 und ISO GPS Normen identisch. Die ASME Y14.5 wird in dieser Arbeit immer

parallel zu ISO betrachtet. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, ist die Analyse der ASME Y14.5 nicht der Fokus dieser Arbeit. Die in dieser Arbeit für ISO entwickelte Analyseverfahren kann ebenfalls für ASME verwendet werden.

Ein wichtiger Definitionsunterschied zwischen ASME Y14.5 und ISO 5459 ist der Aufbau des Bezugs und Bezugssystems für eine Freiformgeometrie. Das Denkmodell von ASME Y14.5 ist der Aufbau des Bezugsreferenzrahmens. Der Bezugsreferenzrahmen wird durch drei senkrecht zueinander stehende Bezugsebenen gebildet [54-61]. Wenn keine senkrechten Bezüge vorhanden sind, werden alle Bezüge oder Bezugsstellen auf ein CS (Koordinationssystem) projiziert. Bild 22 zeigt ein konkretes Beispiel aus ASME Y14.5. Das Bauteil ist wie in Bild 5 von ISO GPS toleriert, jedoch ist das Bezugssystem anders aufgebaut. Alle Bezugsstellen werden auf CS projiziert, die Bezugsebenen sind parallel zu den Ebenen von CS. Jedoch fehlen die Erläuterungen, die expliziten Definitionen und die Vorgehensweise dazu, wie der Ursprung und die Orientierung des CS nach welcher Funktion eines Bauteils gebildet werden sollen. Das ist das Defizit in ASME Y14.5:

Defizit: Die Vorgehensweise vom Aufbau des Bezugssystems in ASME Y14.5 wird nicht explizit erläutert. Ob diese Methode funktionsbasiert ist, wird je nach konkreter Situation beurteilt.

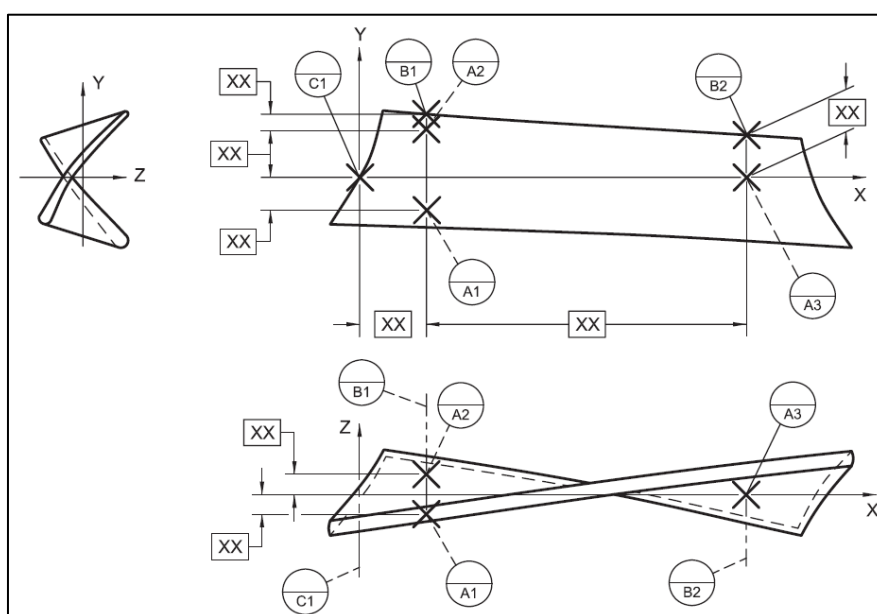


Bild 22 Aufbau des Bezugssystems für Freiformgeometrie nach ASME Y14.5 [11]

Der entsprechende Lösungsansatz zum Aufbau des Bezugssystems für eine Freiformgeometrie befindet sich in Kapitel 4.1 und 6.

2.2 Industrielle Praxis und Defizite

Da ISO GPS Normen den Schwerpunkt auf die Regelgeometrie liegen und Defizite bei Bezügen und Tolerierungen für Freiformgeometrien haben, erstellt fast jedes Unternehmen, dessen Produkte Freiformgeometrie beinhalten (z.B. Automobilindustrie oder Luftfahrtindustrie), eigene Firmennormen, um die Definitionen für die Bezüge und Tolerierungen der Freiformgeometrien aus der eigenen Perspektive zu definieren. Es werden viele einzelne Lösunginseln bei verschiedenen Unternehmen gebildet. Kapitel 2.2.1 stellt die Firmennormen von Automobil- und Luftfahrtindustrie vor. Anschließend werden zwei Praxisbeispiele, Kotflügel und Turbinenschaufel, mit deren Defiziten in Kapitel 2.2.2 dargestellt.

2.2.1 Firmennormen

Automobilindustrie:

Am Produktentstehungsprozess eines Kfz ist eine Vielzahl von verschiedenen Bauteilen in unterschiedlichen Bereichen beteiligt. Die Toleranzinformationen sind auf den jeweiligen Prozess und die jeweilige Bauteilkomponente bezogen. Um für diese verschiedenen Anwender der Toleranzinformationen eine gemeinsame Basis zu schaffen, wurden in den meisten Automobilunternehmen Konzepte eingeführt, welche für alle Bauteile und Baugruppen die Bezugsebenen festlegen sollen [62]. Diese Bezugsebenen schränken alle sechs Freiheitsgrade des Bauteils ein und beinhalten insgesamt drei einzelne Ebenen, welche orthogonal zueinander liegen und netzparallel zum globalen CS sind. Diese Ebenen müssen punktbasiert festgelegt werden, da die in einer Karosserie vorkommenden Freiformgeometrien selten saubere Regelgeometrien enthalten, welche direkt für die Definition von Ebenen genutzt werden können [62]. Diese Punkte werden in ISO 5459 als Bezugsstelle bezeichnet [8]. Beispiele für solche Automobilunternehmen-Konzepte oder -Systeme sind das RPS (Referenz-Punkt-System) von Daimler und VW, das PLP-Schema (principal-locating-point) von Chrysler und Mazda, das FMK (Funktionsmaßkonzept) von BMW, das ASKF (Locate-sketch-car body-production) von Opel, das MCP (master-control-points) von Ford und das LM (locator-map) von Toyota, welche im Allgemeinen als RPS oder BED Systeme (Bezugsebenen-Definierende-Systeme) bezeichnet werden [63-68].

Luftfahrtindustrie:

Analog zum Automobilbau wird der Aufbau des Bezugssystems für freiförmige Bauteile eines Flugzeugs ebenfalls mit den referenzierten Bezugsstellen beschrieben. Beispielsweise wird für eine Turbinenschaufel auf Basis der Firmennormen zuerst die Grundausrichtungs-Methode, danach die Feinausrichtungs-Methode verwendet [69-74]. Das konkrete Beispiel befindet sich im folgenden Kapitel 2.2.2.

Die Firmennormen von Automobil- und Luftfahrtindustrie sind in der Praxis einfach zu verstehen und zu verwenden, sind jedoch weder genormt, noch wissenschaftlich überprüft. Daher entsteht das Defizit:

Defizit: Die Firmennormen sind nicht normgerecht.

In dieser Arbeit wird die in der Industrie am häufigsten verwendete RPS Methode analysiert. Das folgende Kapitel 2.2.2 stellt zwei Beispiele mit dem Aufbau der Bezüge für einen Kotflügel nach RPS Methode und eine Turbinenschaufel nach Feinausrichtung aus referenzierten Bezugsstellen dar, um die Inhalte der Firmennormen zu zeigen und die Unterschiede zu veranschaulichen.

2.2.2 Praxisanwendungen und Defizite

Ein Bezugssystem wird durch drei senkrecht aufeinander und parallel zur globalen CS stehenden Bezugsebenen gebildet. Dieses Bezugssystem wird im Regelfall nach der 3-2-1-Regel erzeugt [4]. Diese Methode ist eine RPS Methode [75, 76]. Der Unterschied zwischen RPS und ASME Y14.5 ist, dass das von RPS erzeugte CS immer parallel zur globalen CS sein muss. Das von ASME erzeugte CS kann jede Orientierung im Raum haben. Bild 23a zeigt das Bezugssystem für einen Kotflügel, welches nach der RPS Methode aus Automobil-Firmennormen aufgebaut wird. Es befindet sich ein CS im Fahrzeug. Primärbezugsstellen Y1-Y3 werden auf die XZ-Ebene projiziert. Die primäre Bezugsebene ist durch die projizierten Bezugsstellen definiert und ist parallel zur XZ-Ebene. Die Sekundärbezugsstellen Z4 und Z5 werden auf XY-Ebene projiziert und die gebildete Sekundärbezugsebene ist parallel zur XY-Ebene. Die Tertiärbezugsstelle X6 wird auf YZ-Ebene projiziert und die gebildete Tertiärbezugsebene ist parallel zur YZ-Ebene. Wenn der Kotflügel schräg im Raum steht (Bild 23b), müssen auf Basis von RPS trotzdem alle Bezugsstellen unabhängig von der

Funktion des Kotflügels auf globalem CS projiziert werden. Diese Methode berücksichtigt nicht die Funktion des Bauteils. Das ist das Defizit:

Defizit: Die RPS Methode zum Aufbau eines Bezugssystems wird nicht nach der Funktion des Bauteils definiert.

Die Positionstolerierung für ein Loch auf einer schrägen Fläche und die Linienprofiltolerierung für eine Kante beziehen sich beide auf das Bezugssystem Y, Z, X. Dennoch ist die Anwendung einer Positionstoleranz für ein Loch auf einer schrägen Fläche in den ISO GPS Normen nicht explizit definiert. Zusätzlich ist die Zeichnung des Positionstoleranzindikators, welcher direkt mit der Mittelachse des Loches verbunden ist, nach ISO GPS nicht erlaubt. Strenggenommen darf die Linienprofiltoleranz für eine Kante ebenfalls nicht benutzt werden. Aus der Automobil-Firmennorm kann festgestellt werden, dass es zahlreiche Unterschiede im Vergleich zu den ISO GPS Normen gibt.

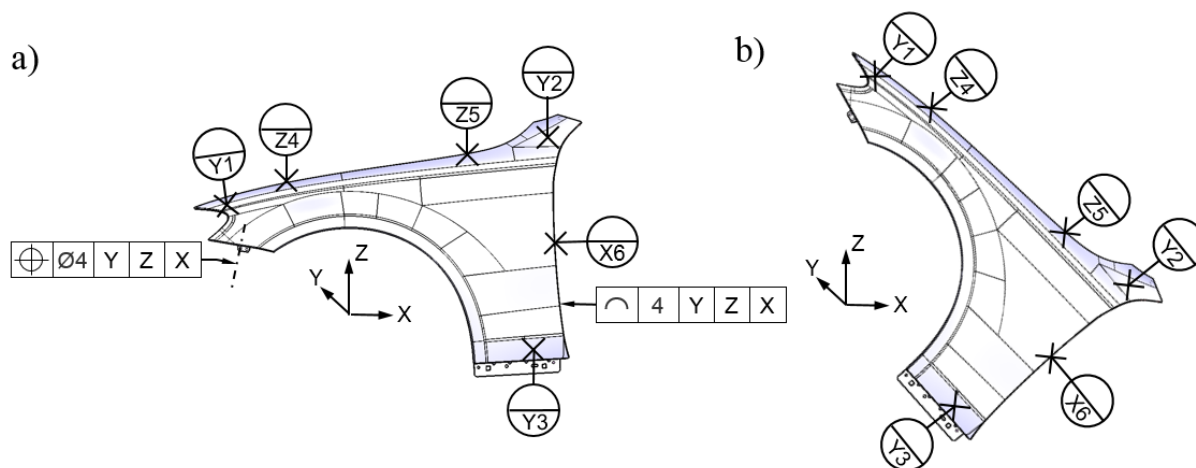


Bild 23 Bezugssystem und Tolerierung nach der RPS Methode für einen Kotflügel.

Bild 24 zeigt eine Turbinenschaufel als Beispiel. Die Turbinenschaufel wird zuerst mit der Grundausrichtung anhand des Bezugssystems C, A und B ausgerichtet (Bild 24a). Um das Profil der Turbinenschaufel genau zu tolerieren, muss die Feinausrichtungs-Methode (Bild 24b) an der Oberfläche verwendet werden. Der Bezug von dem Turbinenschaufelprofil kann nach der Feinausrichtung mit drei referenzierten Bezugsstellen aus Luftfahrt-Firmennormen definiert werden. Bezug D ist ein mit den drei Bezugsstellen in Beziehung stehendes Symbol. Nach der Firmennorm ist der Bezug D kein Geometrielement (keine Ebene) [77-86]. Das unterscheidet sich im Vergleich zur RPS Methode und verstößt gegen die Definition von Bezug in ISO 5459.

Defizit: Der von Luftfahrt-Firmennormen gebildete Bezug für eine Turbinenschaufel verstößt gegen die Definition eines Bezugs in ISO 5459.

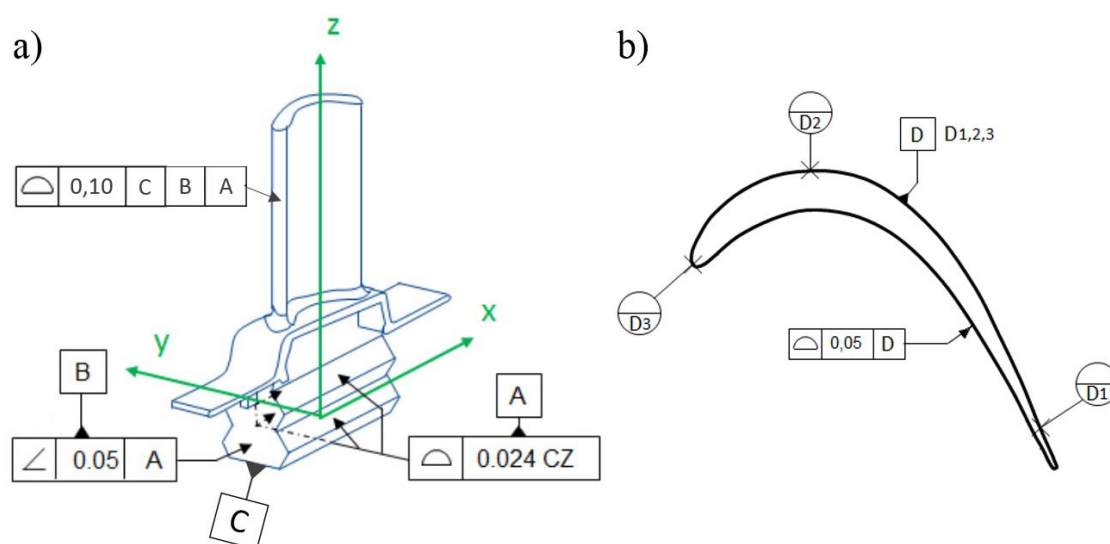


Bild 24 Bezug und Tolerierung für eine Turbinenschaufel nach a) Grundausrichtung und b) Feinausrichtung aus referenzierten Bezugsstellen [70, 87, 88]

Durch die beiden Beispiele aus den verschiedenen Industriebereichen mit unterschiedlichen Firmennormen kann die Aussage getroffen werden, dass aufgrund der Unvollständigkeit der ISO GPS Normen viele Lösungsiseln (Firmennormen) entstehen. Um eine weltweite und reproduzierbare Lösung zu finden, sollten die Inhalte der ISO GPS Normen dringend erweitert und ergänzt werden. In dieser Arbeit werden Vorschläge zur Ergänzung und Erweiterung der Definitionen von ISO 5459, 1101, 1660 und 5458 wiedergegeben.

2.3 Stand der Forschung zu Bezügen und Tolerierung und deren Grenze

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Literaturrecherche im Forschungsgebiet „Bezüge und Tolerierungen“ vorgestellt. Während der Literaturrecherche tauchten immer wieder dieselben Autoren auf, wie z.B. C.M. Shakarji, V. Srinivasan, B. Anselmettia, P. Bennich und Z. Humienny, die in diesem Bereich Forschungen betreiben. Das zeigt, dass der Literaturkreis dieses Forschungsgebiets dadurch begrenzt ist. Daraus ergibt sich ein stabiler Stand der Forschung in dieser Arbeit. Es wurden insgesamt ca. 200 Quellen im Bereich Bezüge und Tolerierung in dieser Arbeit recherchiert. In der Literatur kann zwischen vier Hauptaktivitäten

in diesem Forschungsbereich unterschieden werden: Untersuchung der Historie und Struktur der ISO GPS Normen; Erläuterung der Grundlagen von Bezügen und Tolerierung; mathematische Analyse und Anwendung der ISO GPS Normen und ASME Y14.5 in Messtechnik und die Umsetzung der Normen in 3D CAD Programmen. Es existiert kaum Literatur, die die Vollständigkeit nach der Art der Geometrielemente der gültigen ISO GPS Normen und ASME Y14.5 überprüft und Verbesserungsvorschläge dazu anbietet. Die meisten Quellen beschreiben die neue Methodik zur Umsetzung und Anwendung der ISO oder ASME in der CMM (Koordinatenmessgerät) bei Messmaschinen oder im 3D CAD Programm. Dies ist nicht der Fokus dieser Arbeit, sondern die grundsätzliche, wissenschaftliche Betrachtung der gesamten Systematik zu Bezügen und Tolerierungen gemäß den ISO GPS Normen. Die Literaturrecherche zeigt, dass eine enorme Forschungslücke zum Thema Verbesserung der Vollständigkeit der internationalen Toleranznormen existiert.

2.3.1 Historie und Struktur der ISO GPS Normen

Die aktuellen 143 ISO GPS Normen wurden von ISO/TC 213 (Technisches Komitee) erstellt. Das Komitee wurde im Jahr 1996 aus einer Gruppe von drei Experten, unter der Leitung von Per Bennich, gegründet [89]. Mittlerweile besteht das Komitee aus 25 teilnehmenden und 28 beobachtenden Mitgliedsländern [2]. Das ISO/TC 213 beschäftigt sich mit der Erstellung des internationalen Standards für Bemaßung, Tolerierungen, Spezifikation und Verifikation für Geometrielemente. Die Quellen [90-101] beschreiben den Aufbau, die Struktur, den Überblick und die Historie der ISO GPS Normen und wie die aktuellen ISO GPS Normen zu Stande gekommen sind. Es gibt keine Literatur, die die Perspektive der Struktur von ISO GPS Normen überprüft, und ob durch diese Struktur alle Themen zu Bezügen und Tolerierungen der GE abgedeckt werden können.

2.3.2 Erläuterung der Grundlagen von Bezügen und Tolerierungen

Da die ISO GPS Normen sehr kompliziert geschrieben und schwer zu verstehen sind, gibt es zahlreiche Quellen, welche die ISO GPS Normen interpretieren und mit vielen praxisnahen Beispielen erklären. Diese Interpretationen und Erklärungen der ISO GPS Normen stammen aus den eigenen Erfahrungen der jeweiligen Autoren. Die Quellen werden als Sekundärliteratur eingestuft. Die folgenden Quellen [39, 102-131] beschreiben die grundlegenden Kenntnisse, die Erläuterung der Terminologie und Erklärung der Definitionen von Bezügen und

Tolerierungen aus den ISO GPS Normen sowie ASME Y14.5. Jedoch sind diese Quellen keine Ergänzung der Theorien der ISO GPS Normen, sondern Erklärungen.

2.3.3 Mathematische Analyse und Anwendung in der Messtechnik

Die Untersuchung einer vollständigen Theorie zur Ergänzung der Systematik von Aufbau eines funktionsbasierten Bezugs und Bezugssystems und Erweiterung der Definitionen von Toleranzsymbolen aus internationalen Toleranznormen zeigt, dass die meisten Wissenschaftler die mathematische Analyse von Filtration und die Anwendung der internationalen Normen in der Messtechnik untersuchen. Zum Beispiel: Analyse der Bezüge und Tolerierung in einer Prozesskette [132-136]; Methode zur Vermessung einer Freiformgeometrie in Messmaschinen und Messsoftware [137-145]; Erstellen einer Theorie und Algorithmen mit Hilfe einer mathematischen Analyse und mathematischer Filtration für den Aufbau eines Bezugs [146-168]; Verifikation und Fehlerauswertung einer Tolerierung in der Messmaschine [169-182]. Die meisten Forschungsergebnisse der zitierten Literatur aus diesem Kapitel sind auf der Basis der ISO GPS Verifikationsnormen erstellt [183-194]. Die ISO Spezifikationstheorie zu Bezügen und Tolerierungen wurden nicht untersucht.

2.3.4 Umsetzungen der internationalen Toleranznormen im CAD

Zahlreiche Quellen beschreiben die Umsetzungen der bestehenden Theorie von ISO GPS Normen und ASME Y14.5 in einem 3D CAD Programm, ohne die Theorie von den internationalen Normen selbst anzuzweifeln und/oder zu verbessern. Die Literaturquellen beschreiben meist die folgenden Themen: Interpretation der Semantik von geometrischen Dimensionierung und Tolerierung (GD&T) im CAD Prozess; Darstellung der 2D Toleranzinformationen in 3D Ansicht im CAD Programm; Integration der GPS Theorie in den methodischen Engineering-Prozess; neue Tools und Programmierung für die Umsetzung der GPS in die STEP (Standard for the Exchange of Product model data) Daten usw. Die entsprechende Literatur befindet sich in der folgenden Literaturliste [195-225].

3 Aufgabenstellung, Zielsetzung und Ansatz

Nach der Beschreibung des Stands der Technik und Analyse der Defizite in den einschlägigen Normen werden in diesem Kapitel zuerst die Aufgabenstellung und die Zielsetzung in Bild 25 dargestellt. Anschließend wird der Ansatz, wie die Forschungsfragen geklärt und gelöst werden, vorgestellt. Die resultierende Zielsetzung der Arbeit: Aufbau einer vollständigen Systematik zum Einzelbezug, gemeinsamen Bezug und Bezugssystem; Erweiterung und Ergänzung der Definition der Linienprofilltoleranz, Verbundtoleranz und Positionstoleranz.

3.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Bild 25 zeigt das gesamte Schema der in dieser Arbeit neu entwickelte Bezüge und Tolerierungen-Systematik. Die Graubereiche bedeuten, dass die Definition der Bezüge und Tolerierungen bereits in den ISO GPS Normen definiert sind. Die Skala basiert auf den in der ISO bereits definierten Definitionen bezogen auf die gesamten Arten der GE. Die Aufgabe der Arbeit ist es, die Weißbereiche – Definitionslücken der ISO GPS Normen zu füllen. Der Bezug bildet die Basis für die Richtungs- und Ortstolerierung. Deshalb wird diese neue Systematik in *Bezüge und Bezugssysteme* und *Tolerierung* unterteilt (Bild 25). Um ein Bezugssystem aufzubauen, müssen zuerst die einzelnen Bezüge gebildet werden. Bezüge können in Einzelbezug und gemeinsamem Bezug unterteilt werden. Ein Bezug besteht aus einer Ebene, einer Geraden, einem Punkt oder einer Kombination aus diesen [8, 226]. Es gibt einen Sonderfall für den Bezug eines Durchbruchs aus einem dünnwandigen Bauteil, jedoch ist dieser in ISO 5459 nicht definiert. Analog zum Einzelbezug wird der gemeinsame Bezug in Ebene-Ebene, Gerade-Gerade, Punkt-Punkt und in weitere verschiedene Kombinationen dieser Elemente unterteilt.

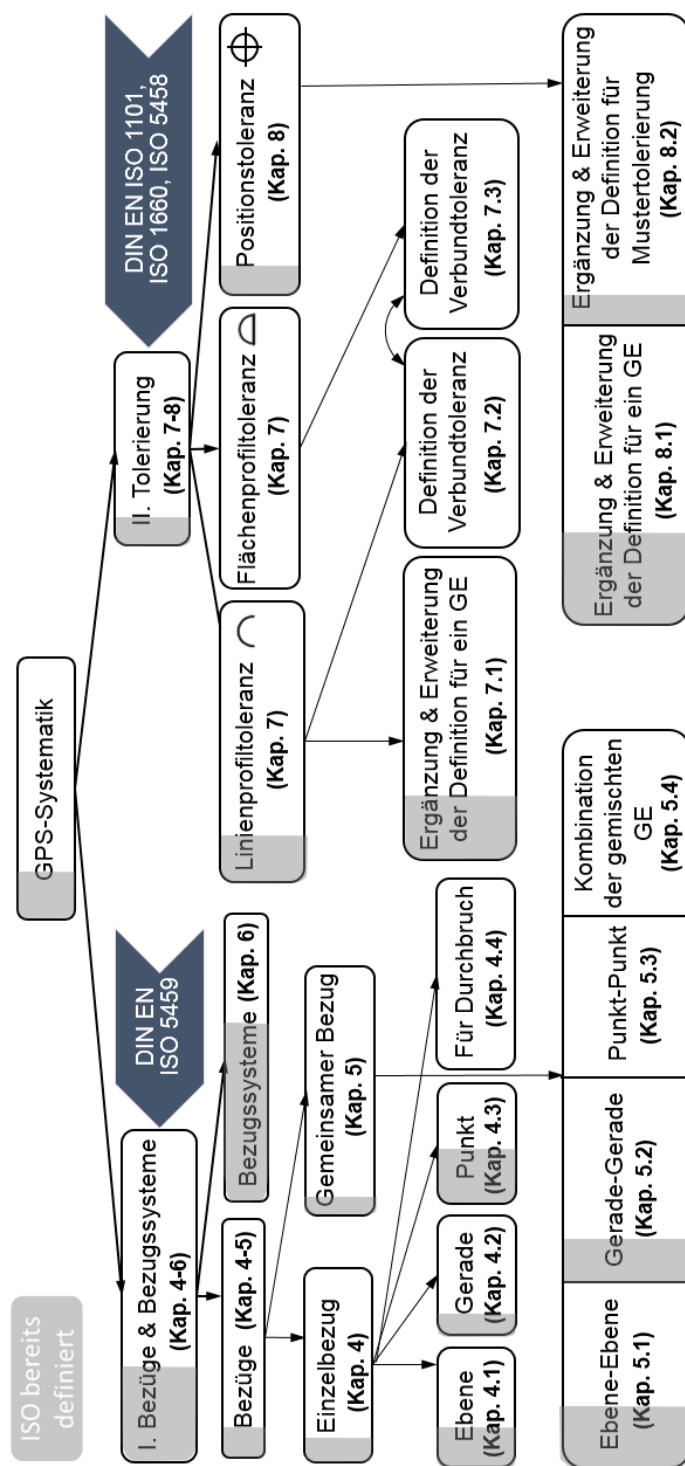


Bild 25 Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit

Die zweite Systematik ist die *Tolerierung*. Aus dem im vorangegangenen Kapitel 2.1.3 beschriebenen Grund können die drei Toleranzsymbole: Positionstoleranz, Linienprofil- und Flächenprofilltoleranz die restlichen 11 Toleranzsymbole ersetzen. Die Definitionen der Linienprofilltoleranz sollen auf Basis der ISO 1101 und ISO 1660 ergänzt und erweitert werden.

Es gibt keine Definition der Verbundtoleranz nach ISO GPS Normen, daher wird eine Definition für „Verbundtoleranz von Linienprofiltoleranz“ erstellt. Die Definition von Flächenprofiltoleranz ist eindeutig nach ISO 1101 und ISO 1660 definiert und benötigt keine weitere Ergänzung, jedoch muss die „Definition von einer Verbundtoleranz“ für Flächenprofiltoleranz ebenso analysiert werden. Da die Linienprofiltoleranz eine Linie (2D GE) und die Flächenprofiltoleranz eine Fläche (3D GE) beschreibt, existiert eine Schnittstelle zwischen Linien- und Flächenprofiltoleranz. Die Positionstoleranz soll ebenfalls auf Basis der ISO 1101 und ISO 5458 ergänzt und erweitert werden. Ihre Definition zu Mustertolerierungen benötigt eine offensichtlich logisch aufeinander aufgebaute Struktur. Die detaillierte Analyse zu den jeweiligen Themen vom gesamten Schema der Bezüge und Tolerierungen-Systematik wird in den entsprechenden Kapiteln beschrieben.

Das Ziel der Arbeit ist es, die gültigen Normen und aktuellen Entwürfe von ISO 5459, ISO 1101, ISO 1660 und ISO 5458 zu ergänzen und zu erweitern, damit die verbesserten ISO GPS Normen für jeden Industriebereich mit allen Arten der Geometrielemente, besonders für den Automobilbau und die Luftfahrtindustrie, verwendbar sind.

3.2 Ansatz

Um die konkreten Forschungsaufgaben zu erfüllen und um das Ziel dieser Arbeit zu erreichen, werden viele einzelne, konkrete Systematiken zu den jeweiligen Themen (Bild 26-Bild 31) auf Basis von der Systematik in Bild 25 als Lösungsansatz entwickelt. Das neue Denkmodell in dieser Arbeit ist die Analyse der Herkunft eines GE, welches im Vergleich zum ISO Denkmodell, nämlich der Analyse der Phasen vom Lebenszyklus eines Werkstücks, komplett neu ist. Das neue Denkmodell gewährleistet die Vollständigkeit der entwickelten Systematiken, welche für alle GE verwendbar sind. Dieses Denkmodell wird als Ansatz für die gesamte Arbeit verwendet.

Bild 26 zeigt den Ansatz des Aufbaus einer vollständigen Systematik für den Einzelbezug aus der Bezüge und Tolerierungen-Systematik: Bezüge und Bezugssysteme. Wie bereits in Kapitel 2.1.2.1 beschrieben, kann der Einzelbezug in Ebene, Gerade und Punkt unterteilt werden. Zusätzlich existiert ein Sonderfall: Einzelbezug für einen Durchbruch. Je nach Herkunft des Bezugselements kann die Ebene, die Gerade und der Punkt in ein reales GE und ein abgeleitetes GE unterteilt werden. Die konkreten GE sind in Bild 26 dargestellt. Das Grunddenkmodell des Ansatzes für den Aufbau eines Bezugs ist die Analyse der Herkunft eines

GE, da ISO an GE denkt und mit diesen arbeitet. Das beweist die Funktionstüchtigkeit dieses Denkmodells und wird daher in dieser Arbeit verwendet. Je nach eingeschränkter Translation des Durchbruchs kann dieser in 4-Wege- und 2-Wege-Durchbruch unterteilt werden. Die detaillierte Analyse befindet sich in den entsprechend genannten Kapiteln.

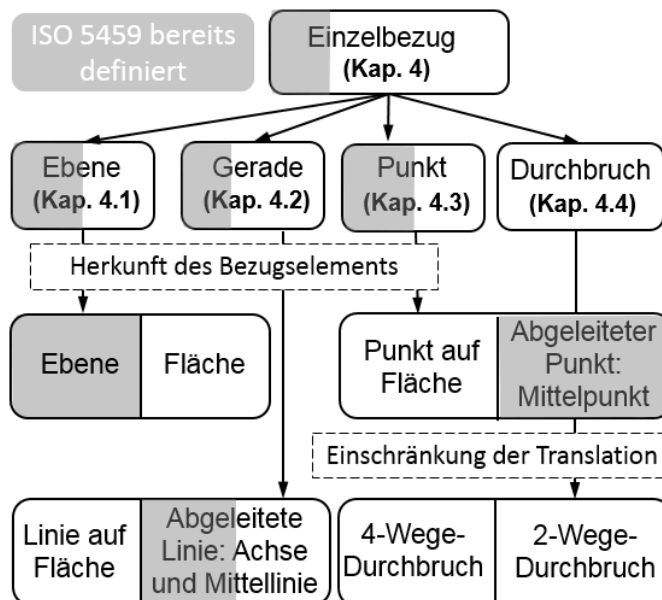


Bild 26 Ansatz für Einzelbezug

Bild 27 zeigt den Ansatz des Aufbaus einer vollständigen Systematik für den gemeinsamen Bezug. Der gemeinsame Bezug kann, wie in Kapitel 2.1.2.2 beschrieben, in Ebene-Ebene, Gerade-Gerade, Punkt-Punkt und in Kombinationen derer unterteilt werden. Unter Ebene-Ebene kann je nach der relativen Orientierung der beiden Ebenen in Parallelität, Rechtwinkligkeit und Winkligkeit unterteilt werden. ISO GPS hat bis jetzt nur den Fall der Parallelität definiert. Rechtwinkligkeit und Winkligkeit der zwei einzelnen Bezugsebenen hat ISO jedoch nicht definiert. Analog zu Ebene-Ebene, kann Gerade-Gerade ebenfalls in die drei Fälle unterteilt werden. Dennoch hat ISO ebenso nur die Parallelität betrachtet. Mathematisch gesehen gibt es bei Punkt-Punkt weder Parallelität, noch Rechtwinkligkeit oder Winkligkeit zwischen zwei Punkten, da ein Punkt keine Richtung besitzt. Deswegen wird die Richtungsbeziehung zwischen zwei Punkten als „Relative Orientierung“ bezeichnet, was ebenso nicht in ISO beschrieben ist. Die Kombinationstabelle (Kapitel 5.4) beschreibt die Kombinationsmöglichkeiten von Ebene, Gerade und Punkt, z.B. Ebene-Punkt oder Ebene-Gerade usw. Diese kann in zwei Gruppen unterteilt werden: Kombinationstabelle ohne Bedeutung der Reihenfolge des Einzelbezugs (z.B. Ebene-Gerade hat dieselbe Bedeutung wie

Gerade-Ebene) und mit Bedeutung der Reihenfolge des Einzelbezugs (z.B. Ebene-Gerade hat einandere Bedeutung wie Gerade-Ebene). In ISO wird nur der erste Fall teilweise beschrieben.

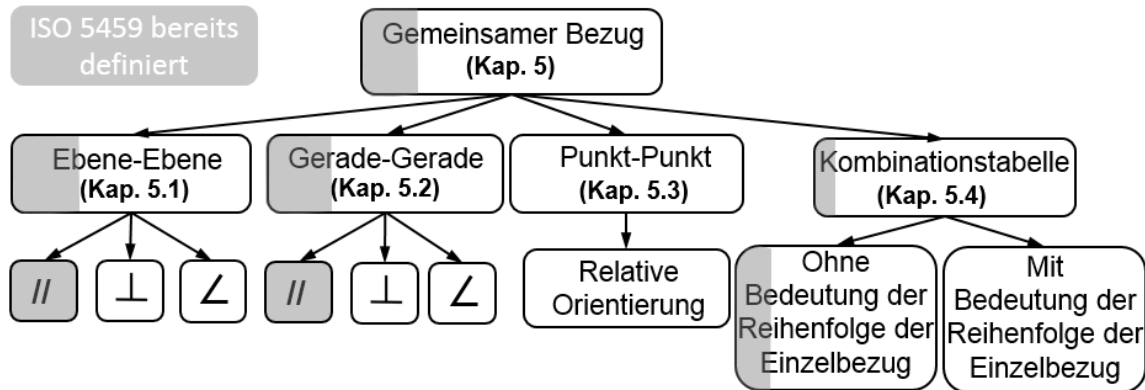


Bild 27 Ansatz für gemeinsamen Bezug

Nach der Beschreibung der Ansätze für Einzelbezug und gemeinsamen Bezug wird nun der Ansatz für das Bezugssystem dargestellt. Bild 28 zeigt den Ansatz für den Aufbau des Bezugssystems, welcher in vier Gruppen unterteilt werden kann: Aufbau des Bezugssystems nach ISO 5459 Methode, ASME Y14.5 Methode, Firmennormen RPS-Methode und der in dieser Arbeit neu entwickelten Methode. Die neu entwickelte Methode wird detailliert in den Kapiteln 4 und 6 vorgestellt.

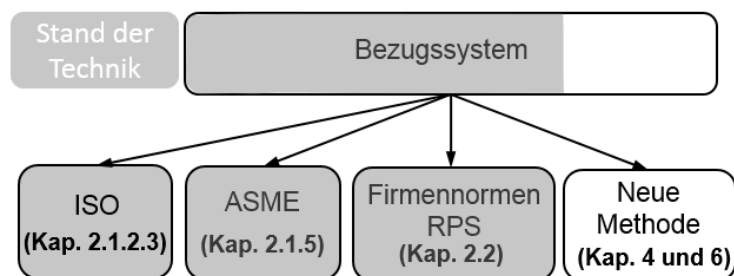


Bild 28 Ansatz für den Aufbau des Bezugssystems

Nach der Erläuterung des Ansatzes zur ersten Systematik: *Bezüge und Bezugssysteme* wird nun der Ansatz der zweiten Systematik: *Tolerierung* vorgestellt. Bild 29 zeigt den Ansatz für die Erweiterung der Definitionen für Linienprofilltoleranz und deren Verbundtoleranz. Bei Erweiterung und Ergänzung der ISO Definitionen kann der Ansatz nach der Herkunft des TGE in reales GE und abgeleitetes GE unterteilt werden. Das Denkmodell wurde in Kapitel 2.1.3 in Bild 11 vorgestellt. Der Unterschied des Denkmodells zwischen den zwei Systematiken ist, dass die Bezüge und Bezugssysteme nach der Herkunft des Bezugselements und bei der

Tolerierung nach der Herkunft des TGE unterteilt werden. Das ist ein ähnliches Denkmodell, jedoch ist das Subjekt von Unterteilung der Herkunft anders. Wie bereits in Kapitel 2.1.3.2 beschrieben, kann die Verbundtoleranz in vier Fälle unterteilt werden. Jedoch gibt es keine Definition von Verbundtoleranz in den ISO GPS Normen. In Kapitel 7.2 wird das Thema Verbundtoleranz mit entsprechenden Beispielen im Detail beschrieben.

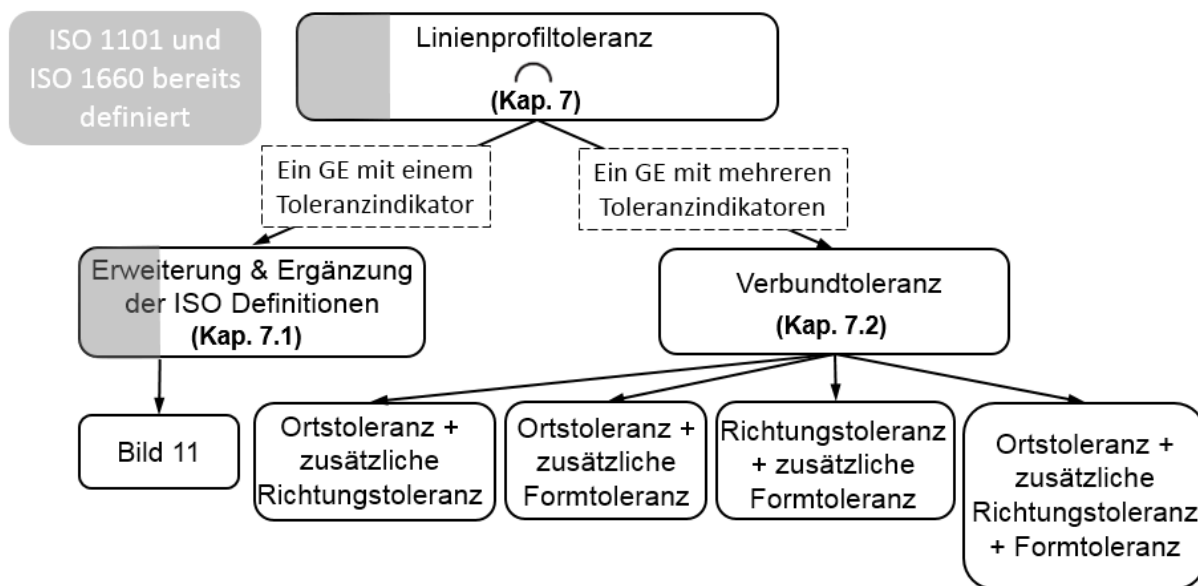


Bild 29 Ansatz zur Erweiterung der Definitionen der Linienprofiltoleranz

Analog zur Verbundtoleranz der Linienprofiltoleranz wird die Verbundtoleranz der Flächenprofiltoleranz ebenfalls in dieselben Gruppen unterteilt (siehe Bild 30). Die detaillierte Analyse befindet sich in Kapitel 7.3.

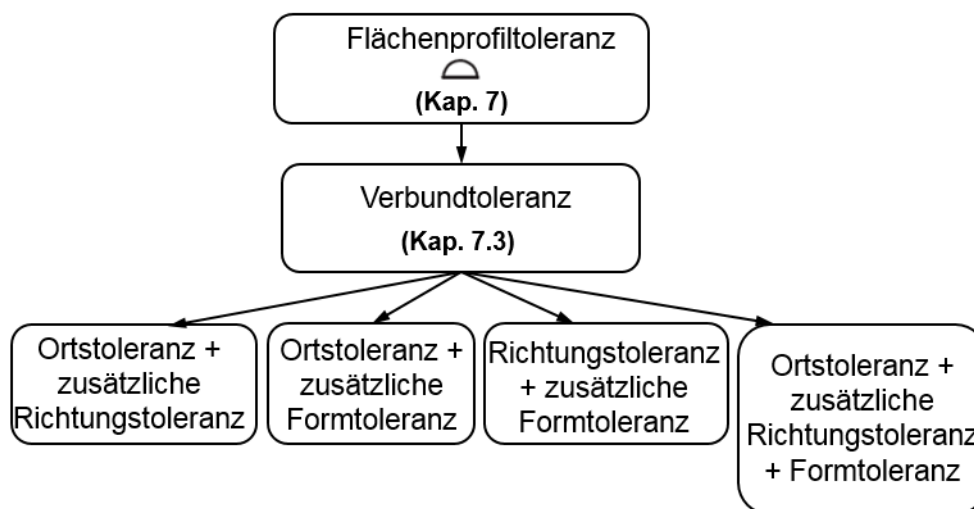


Bild 30 Ansatz für die Verbundtoleranz der Flächenprofiltoleranz

Bild 31 zeigt den Ansatz für die Erweiterung der Definition für Positionstoleranz. Je nach Anzahl der Toleranzindikatoren der GE kann die Positionstoleranz in „Erweiterung und Ergänzung der ISO Definitionen“ und in „Mustertolerierung von Positionstoleranz“ unterteilt werden. Zur Erweiterung und Ergänzung der ISO Definitionen wurde der Ansatz bereits in Bild 14 vorgestellt. Der Ansatz ist ebenfalls gemäß dem Denkmodell der Herkunft des TGE erstellt. Der Ansatz zur Mustertolerierung der Positionstoleranz wurde in Bild 19 dargestellt. Zusätzlich wird eine Kombinationstabelle von Orts-, Richtungs- und Formtoleranz der Mustertolerierung in Kapitel 8.2 vorgestellt.

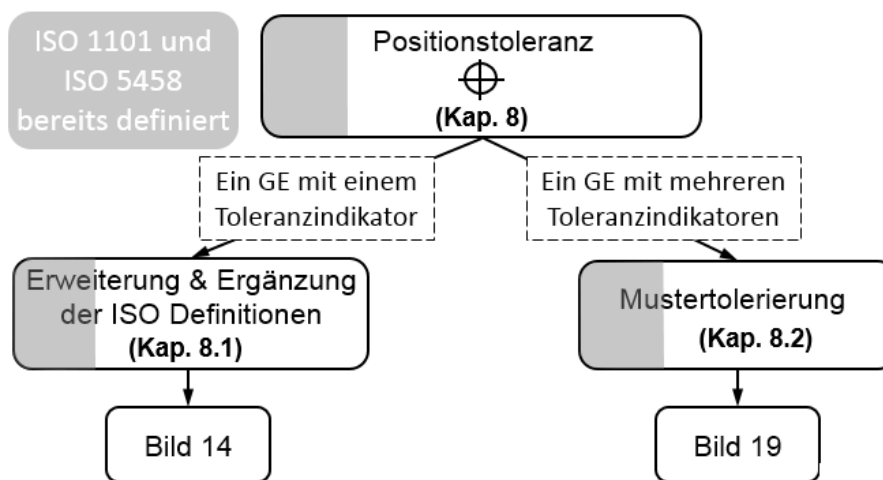


Bild 31 Ansatz zur Erweiterung der Definitionen für Positionstoleranz

4 Systematik zum Aufbau eines Einzelbezugs

Dieses Kapitel beschreibt die neu entwickelte Systematik für den Aufbau eines Einzelbezugs: Ebene (Kapitel 4.1), Gerade (Kapitel 4.2) und Punkt (Kapitel 4.3) auf Basis der ISO 5459. Kapitel 4.4 beschreibt den Aufbau eines Bezugs für Durchbrüche, welche in den ISO GPS Normen nicht definiert sind, aber häufig in der Praxis verwendet werden.

4.1 Ebene als Bezug

Dieser Abschnitt beschreibt den Aufbau einer theoretisch-exakten Ebene als Einzelbezug [227], welcher aus einer Ebene oder einer Fläche entstanden ist.

4.1.1 Bezug aus einer Fläche

Bild 32 stellt die gesamte Systematik zum Aufbau einer Ebene als Bezug dar. Eine Bezugsebene kann in Einzelbezug und in gemeinsamen Bezug unterteilt werden. Ein Einzelbezug kann je nach Bezugselement aus einer Fläche oder zwei Flächen entstehen. Nach der Herkunft des Bezugs kann eine Fläche in Ebene und Freiformfläche unterteilt werden. Wenn das Bezugselement eine Ebene ist, kann nach der Definition von ISO 5459 die Ebene als Bezugsebene direkt gebildet werden, unabhängig davon, ob das Bezugselement eine gesamte Ebene oder Teil einer Ebene ist. Für den Fall, dass das Bezugselement eine Freiformfläche ist, ist der Bezug nach ISO 5459 unklar und teilweise widersprüchlich definiert (siehe Kapitel 2.1.2.1). Die Herkunft des Bezugselements für den Aufbau der Bezugsebene aus einer Freiformfläche kann eine gesamte Freiformfläche (Bild 32a) oder ein Teil einer Freiformfläche (Bild 32 b, c und d) sein.

Es gibt insgesamt zwei Zeichnungsmöglichkeiten, um den Bezug auf einer Freiformfläche zu kennzeichnen:

1. Mit Anwendung eines einzigen Bezugssymbols auf der gesamten Freiformfläche (Bild 32 a) oder auf einem Teil einer Freiformfläche (Bild 32 b).
2. Mit Anwendung der drei (punktförmigen oder flächenförmigen) Bezugsstellen auf einer Freiformfläche (Bild 32 c und Bild 32 d).

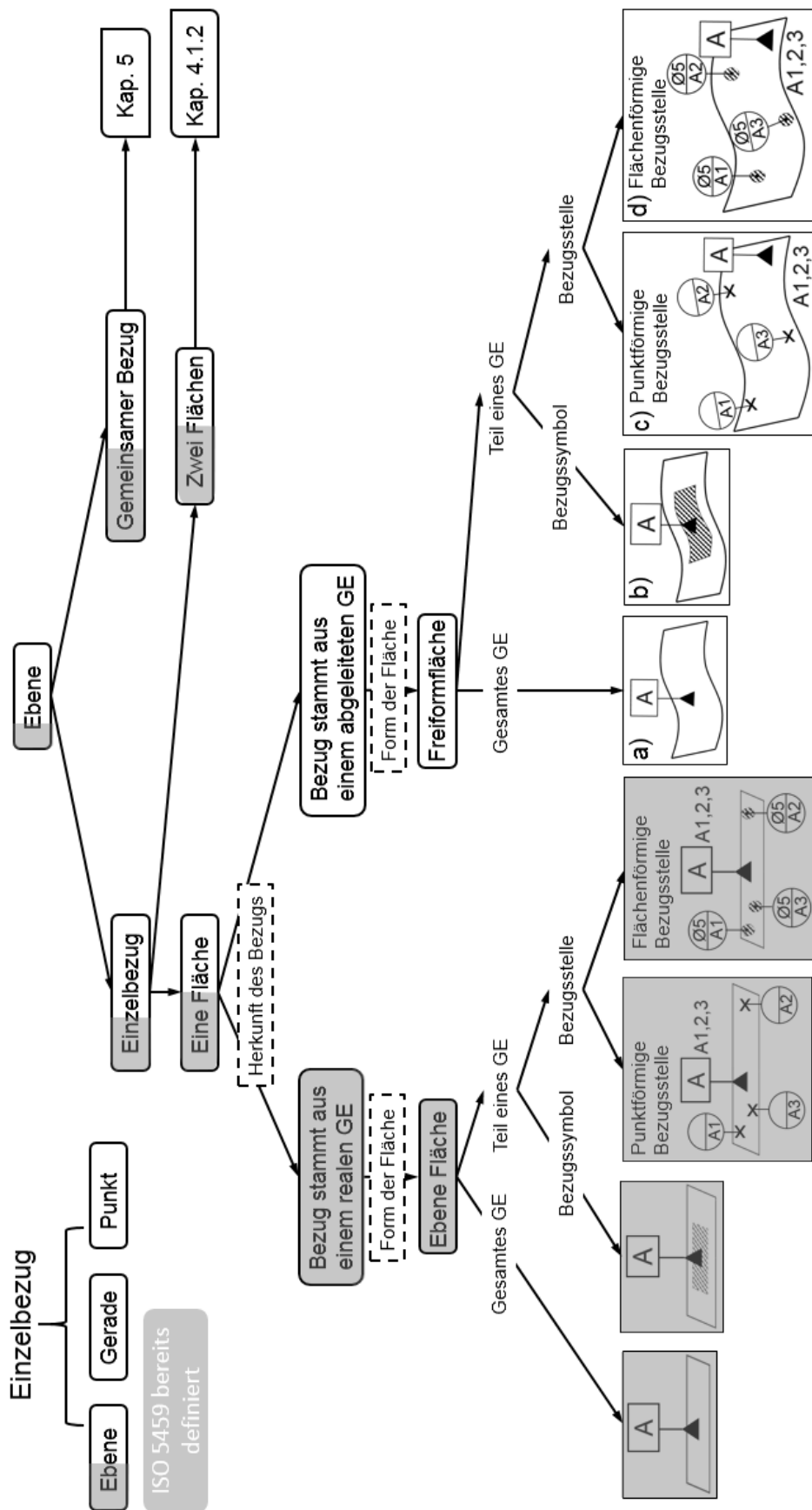


Bild 32 Gesamte Systematik für den Aufbau einer Ebene als Einzelbezug

Auf die erste Zeichnungsweise sollte verzichtet werden, da ein unnachvollziehbarer Prozess zum direkten Aufbau der Bezugsebene aus einer gesamten oder einem Teil einer Freiformfläche verursacht wird (Bild 4). Um eine Ebene aufzubauen, müssen theoretisch mindestens drei explizit definierte Bezugsstellen auf der Freiformfläche angegeben werden. In diesem Fall sind keine Bezugsstellen vorhanden, deswegen sollte auf diese Zeichnungsweise verzichtet werden. Dies verursacht ebenfalls Messungenauigkeiten bei der Messung.

Aufgrund der Definitionsunklarheit (Bild 5) von ISO 5459, gibt es Schwierigkeiten beim Aufbau einer Bezugsebene mit Verwendung der drei Bezugsstellen [228]. In dieser Arbeit werden dazu vier Methoden detailliert vorgestellt und analysiert (Bild 33 - Bild 35). Davon gibt es nur eine einzige Methode, die die funktionsbasierte Bezugsebene aufbauen kann.

Bild 33 stellt die ISO 5459 Methode dar. Bild 33a zeigt das gleiche Bauteil wie bei Bild 32a. Um die ISO Methode besser zu verstehen und um ihre Funktionsfähigkeit besser zu überprüfen, wird diese Methode auf ein einfaches Freiformbauteil (Freiformhebel) in Bild 33b angewendet. Bild 33b zeigt die drei Bezugsstellen A1-A3 des Freiformhebels und Bild 33c ist die Seitenansicht. Wenn das Bauteil mit den drei Bezugsstellen in der Praxis ausgerichtet wird, kann das Bauteil nur noch „horizontal“ (entlang der Y-Achse) bewegt werden. Der horizontale Pfeil symbolisiert die reale Bewegungsrichtung. Nach einer Interpretation von ISO 5459 wird die Bezugsebene aus A1-3 gebildet und liegt schräg im Raum (Bild 33c). Diese Bezugsebene zeigt die Bewegungsrichtung dieses Bauteils, jedoch entspricht diese schräge Bewegungsrichtung nicht der Realität, wie das Bauteil in der Praxis unter Wirkungen der drei Bezugsstellen bewegt werden soll.

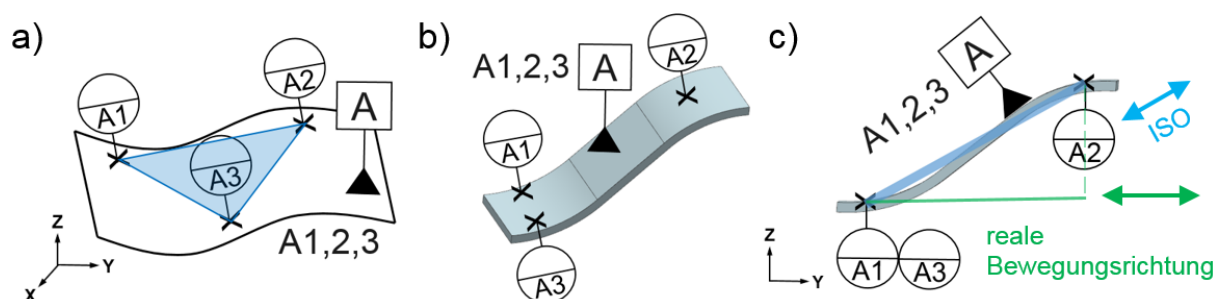


Bild 33 ISO 5459 Methode. a) Direkt Verbindung der drei Bezugsstellen, b) Beispiel mit anderem Bauteil, c) Implizierte Bewegungsrichtung von ISO 5459 und reale Bewegungsrichtung vom Bauteil

Die ISO Methode ist einfach zu verstehen und ihre Messwirkfläche, die durch direkte Verbindung der drei Bezugsstellen aufgebaut ist, reicht aus. Dennoch ist diese Methode nicht funktionsbasiert und spiegelt nicht das reale Verhalten des Werkstücks wieder.

Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> • Diese Methode ist einfach nachzuvollziehen • Die Messwirkfläche ist ausreichend 	Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> • Nicht funktionsbasierte Vorgehensweise des Aufbaus einer Bezugsebene
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Wie bereits in Kapitel 2.1.5 und 2.2 beschrieben wurde, gibt es lediglich einen Unterschied zwischen der RPS- und ASME Methode, um eine Bezugsebene aufzubauen. Das CS der RPS-Methode ist das globale, netzparallele Koordinatensystem. Das CS der ASME-Methode kann eine beliebige Orientierung im Raum haben, jedoch wird die Festlegung der CS-Orientierung nicht in ASME Y14.5 definiert. Die zwei Methoden werden zusammen in Bild 34 dargestellt. Wenn das CS netzparallel ist, dann sind die RPS- und ASME-Methode identisch. Auf Basis der beiden Methoden werden die Bezugsstellen A1-A3 auf die YX-Ebene projiziert. Die Bezugsebene wird durch die projizierten Bezugsstellen A1', A2' und A3' gebildet. Die Fläche der Bezugsebene ist relativ kleiner im Vergleich zur ISO-Methode. Die Methode wird nun auf dem Freiformhebel umgesetzt (Bild 34b). Das Bauteil liegt jetzt horizontal im Raum. A1 und A3 haben die gleiche Höhe auf der Z-Achse. Die Bezugsstelle A2 wird auf der gleichen Höhe von A1 und A3 in YX-Ebene projiziert, die entstehende Bezugsstelle ist A2'. Eine horizontale Bezugsebene wird durch eine Verbindung von A1, A3 und A2' gebildet. In diesem Fall entspricht die Bewegungsrichtung der RPS-/ASME-Methode zufällig ihrer realen Bewegungsrichtung. Wenn das Bauteil schräg im Raum liegt (Bild 34c), dann ist die nach der RPS-Methode gebildete Bewegungsrichtung der Bezugsebene nicht die funktionsbasierte Richtung. Diese Bewegungsrichtung ist unabhängig von der Position des Bauteils und ist immer parallel zur YX-Ebene. In der Realität kann dieses Bauteil mit der Aufnahme der drei Bezugsstellen A1, A2 und A3 nur entlang des schrägen Pfeils bewegt werden, daher ist die RPS-Methode nicht funktionsbasiert. Die gebildete Bewegungsrichtung der ASME-Methode kann je nach CS eine unterschiedliche Richtung haben. Dennoch wird die Vorgehensweise der Festlegung des CS in ASME nicht beschrieben.

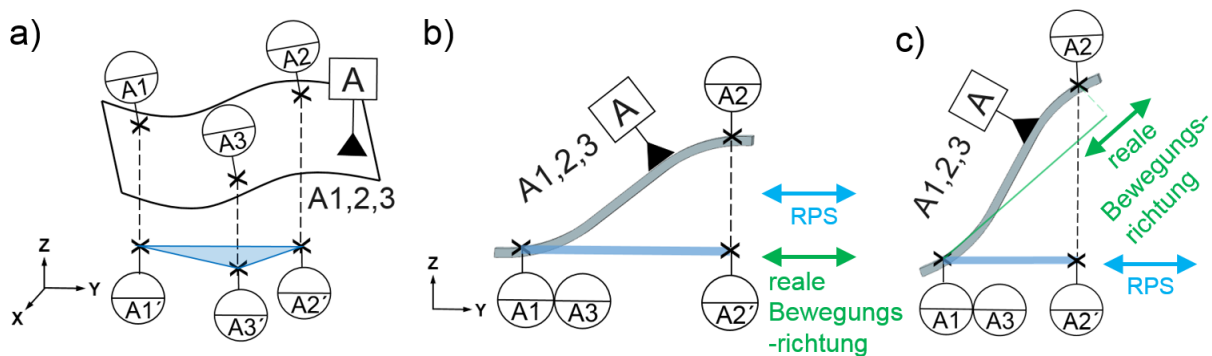


Bild 34 RPS- und ASME-Methode. a) Projektion der drei Bezugsstellen auf YX-Ebene, b) Beispiel mit Freiformhebel, c) erzeugte RPS Bewegungsrichtung und reale Bewegungsrichtung vom Bauteil

Die RPS- und ASME-Methode sind ebenfalls einfach zu verstehen und finden breite Anwendung im Automobilbau. Sie sind anwendungsfreundlich für CMM Messmaschinen. Dennoch sind die gebildeten Messwirkflächen relativ gering und die zwei Methoden entsprechen nicht immer der Realität.

Vorteile:	Nachteile:
<ul style="list-style-type: none"> • Die Methoden sind einfach nachzuvollziehen • Häufig angewendet im Automobilbau • Anwendungsfreundlich für CMM - Messmaschinen 	<ul style="list-style-type: none"> • Die Messwirkfläche ist relativ gering • Nicht funktionsbasierter Aufbau der Bezugsebene für Freiformflächen

Bild 35 stellt die neu entwickelte Methode mit Flächennormalvektoren (FNV) zum Aufbau der Bezugsstellen für Freiformflächen dar. Die schwarzen Vektoren sind die FNV der jeweiligen Bezugsstellen A1, A2 und A3. Sie besitzen unterschiedliche Richtungen. Der rote Vektor ist der Summenvektor der drei schwarzen Vektoren [229, 230, 231]. Der Summenvektor wird auf die jeweiligen Bezugsstellen verschoben, danach werden die drei Bezugsstellen entlang des roten Summenvektors projiziert [232, 233, 234, 235]. Die entstehenden projizierten Bezugsstellen sind A1', A2' und A3' und bilden die Bezugsebene. Diese muss nicht auf der YX-Ebene liegen und besitzt eine relativ ausreichende Wirkfläche. Die FNV-Methode wird nun auf den Freiformhebel angewendet, um die Funktionsfähigkeit dieser Methode zu überprüfen. Bild 35b zeigt den Freiformhebel auf einer horizontalen Position. Die FNV von A1, A2 und A3 besitzen die gleiche Richtung und sind parallel zur Z-Achse. Deswegen hat der summierende Vektor die gleiche Richtung wie die jeweilige Bezugsstelle. Die Bezugsstelle A2 wird entlang ihres FNV auf der gleichen Höhe in Z-Achse von A1 und A3 mit Hilfe von

theoretisch exaktem Maß (TED) [8, 236, 237, 238] projiziert. Die Bezugsebene wird durch A1, A3 und A2' gebildet. Im Fall eines horizontal liegenden Bauteils entspricht die erzeugte Richtung von FNV-Methode des Bauteils der Realität. Wenn das Bauteil schräg im Raum liegt (Bild 35c), ändern sich die FNV der jeweiligen Bezugsstellen automatisch mit. Deshalb ändert sich der summierende Vektor ebenfalls automatisch. In diesem Fall hat der summierende Vektor die gleiche Richtung wie die jeweilige Bezugsstelle. Die entstehende Bezugsebene liegt ebenfalls schräg im Raum. Die von der Bezugsebene hingewiesene Bewegungsrichtung ist mit der realen Bewegungsrichtung identisch. Deswegen ist die FNV-Methode eine funktionsbasierte Methode. Eine Voraussetzung für die Anwendung der Methode ist, dass der Winkelgrenzwert zwischen den jeweiligen Vektoren von Bezugsstellen bei kleiner oder gleich 10° liegen soll. Der Winkelgrenzwert von 10° ist ein empirischer Erfahrungswert. Ist der Grenzwert überschritten, sollte der Konstrukteur die Geometrie des Bauteils optimieren.

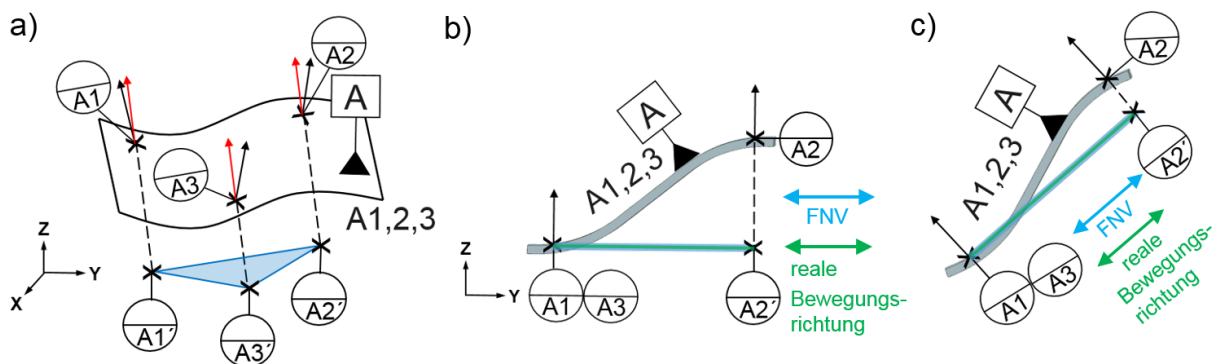


Bild 35 FNV-Methode a) Projektion der drei Bezugsstellen entlang des roten summierenden Vektors; schwarze Vektoren sind jeweiliger FNV b) Beispiel mit Freiformhebel, c) erzeugte Bewegungsrichtung und reale Bewegungsrichtung vom Bauteil

Die FNV-Methode ist die einzige funktionsbasierte Methode, um eine funktionierende Bezugsebene für eine Freiformfläche aufzubauen. Die Messwirkfläche ist relativ ausreichend. Die Methode ist allerdings relativ kompliziert und schwierig in der CMM - Messmaschine umzusetzen.

Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> • Funktionsbasierter Aufbau der Bezugsebene für Freiformfläche ($<10^\circ$) • Die Messwirkflächen sind relativ genügend 	Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> • Kompliziert zu verstehen • Nicht anwendungsfreundlich für CMM - Messmaschinen
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Bild 36 zeigt ein Auswahlprozess der vier Methoden, um die optimale Methode zu erkennen und auszuwählen. Dieser Auswahlprozess ist nach verschiedenen Auswahlkriterien, z.B. Richtungen der FNV der jeweiligen drei Bezugsstellen, aufgebaut. Je nachdem, welche Kriterien erfüllt sind, wird die optimale Methode für den Aufbau der Bezugsebene ausgewählt.

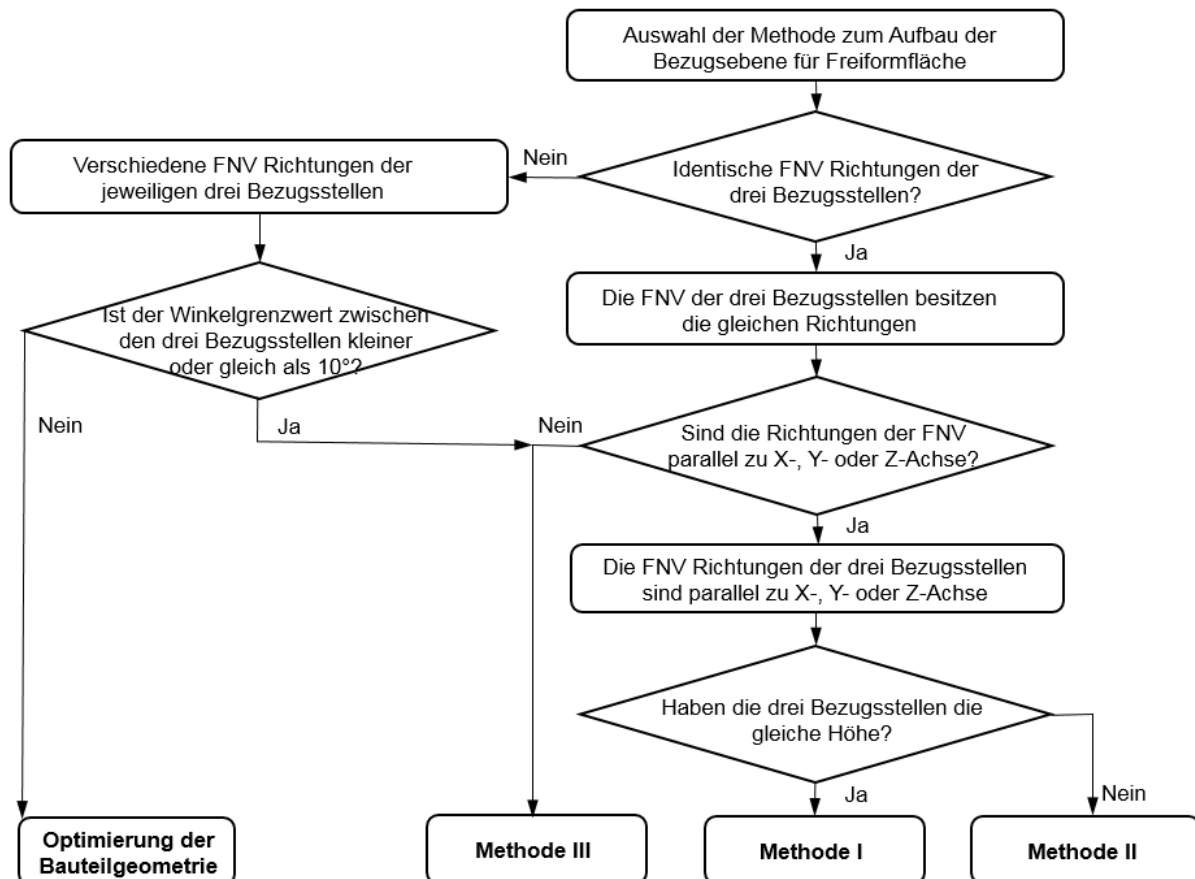


Bild 36 Auswahl der Methode für den Aufbau einer Bezugsebene (Freiformfläche)

Die folgenden Bild 37 und 38 zeigen beispielhaft zwei Bauteile (1. Bauteil mit zwei parallel versetzten Ebenen; 2. Freiformgeometrie), um die Funktionstüchtigkeit der vier Aufbaumethoden des Bezugssystems in der Messsoftware zu überprüfen.

In Bild 37 ist der Bezug von zwei parallel versetzten Ebenen nach ISO die virtuelle mittlere Ebene. Bild 37a stellt die drei Bezugsstellen A1, A2 und D1 dar. Um die Bezugsebene aufzubauen, benötigt die Messsoftware mindestens drei Punkte. Die Messsoftware verwendet automatisch die drei gezeigten Punkte (Bild 37b). Daraus ergibt sich eine schräge Bezugsebene AD, welche nicht der realen Bewegungsrichtung des Bauteils entspricht. Jedoch kann die Messsoftware keine virtuelle mittlere Ebene nach ISO erstellen, da zu wenige Bezugsstellen definiert sind. Das ist ein Hinweis für ein Defizit der ISO-Methode. Bild 37c zeigt dazu die

isometrische Ansicht. Nach der neu entwickelten FNV-Methode kann zusätzlich ein Projektionspunkt A3 mit Hilfe von TED (Abstand zwischen den zwei parallelen Ebenen) in der Messsoftware erzeugt werden [235]. Dadurch kann eine funktionsbasierte Bezugsebene A, welche aus A1 bis A3 besteht, gebildet werden (Bild 37d). Dies entspricht der realen Bewegungsrichtung des Bauteils. In diesem Fall sind RPS- und ASME-Methode zufällig gleich der FNV-Methode. Wenn das Bauteil schräg im Raum steht, dann ist die primäre Bezugsebene, die durch die RPS- und ASME-Methode erzeugt wurde, nicht funktionsbasiert. Die Begründung wurde bereits in diesem Kapitel erläutert. Das Beispiel zeigt, dass die neu entwickelte FNV-Methode funktioniert.

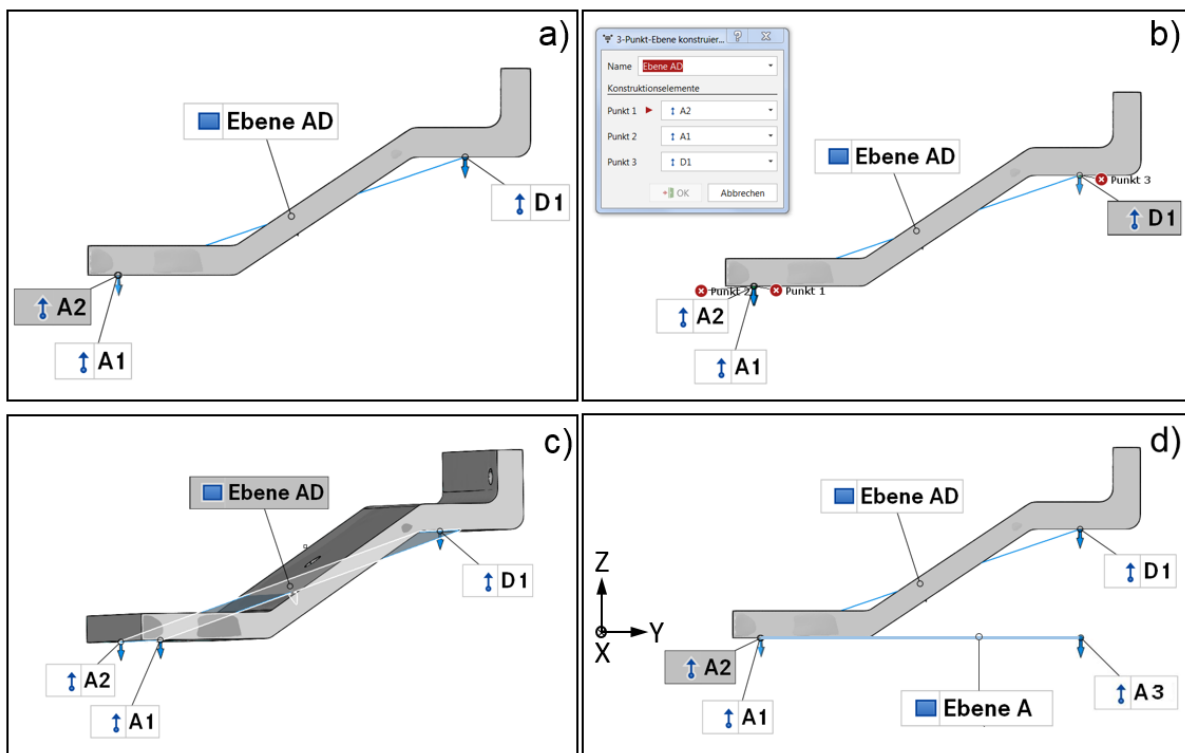


Bild 37 Aufbau der Bezugsebene bei einem Bauteil mit zwei parallel versetzten Ebenen. a) Bezugsstellen A1, A2 und D1; b) Aufbau der Ebene AD in Messsoftware; c) Isometrische Ansicht und d) Aufbau der Ebene A

Zusätzlich wird die Funktionstüchtigkeit der FNV-Methode mit der ISO-Methode in Bild 38 verglichen. Das Bauteil wird zuerst mit Best-Fit Vorausrichtung [84, 85] in der Messsoftware anhand seines CAD Datensatzes ausgerichtet, damit beide Methoden über den gleichen Ausgangszustand verfügen. Die Best-Fit Vorausrichtung bedeutet, dass die Messpunkte des realen Bauteils, welche zum CAD Datensatz am besten passen, mit dem CAD Datensatz in der Messsoftware ausgerichtet werden. Auf Basis der Vorausrichtung wird das Bauteil in der

Messsoftware jeweils auf den zwei unterschiedlichen Bezugsebenen (ISO und FNV) ausgerichtet. Bild 38a zeigt die Messergebnisse des Mittelpunkts vom Loch, welche auf der schrägen Ebene A von der ISO-Methode basieren. Die Y-Abweichung beträgt -0,11 mm. Die schräge Bewegungsrichtung des Bauteils entspricht nicht der realen Bewegungsrichtung, welche aus den Bezugsstellen A1-A3 resultiert. Bild 38b zeigt die Messergebnisse des Mittelpunkts vom Loch nach der netzparallelen Ebene A' von der FNV-Methode. Die Y-Abweichung beträgt in diesem Fall -0,14 mm, welche größer ist als bei der Anwendung der ISO-Methode. Der Grund ist, dass die FNV-Methode der realen Bewegungsrichtung (horizontale Bewegung) des Bauteils entspricht. Daher ist die horizontale Abweichung in Y-Richtung größer. Dies validiert die Anwendbarkeit der FNV-Methode.

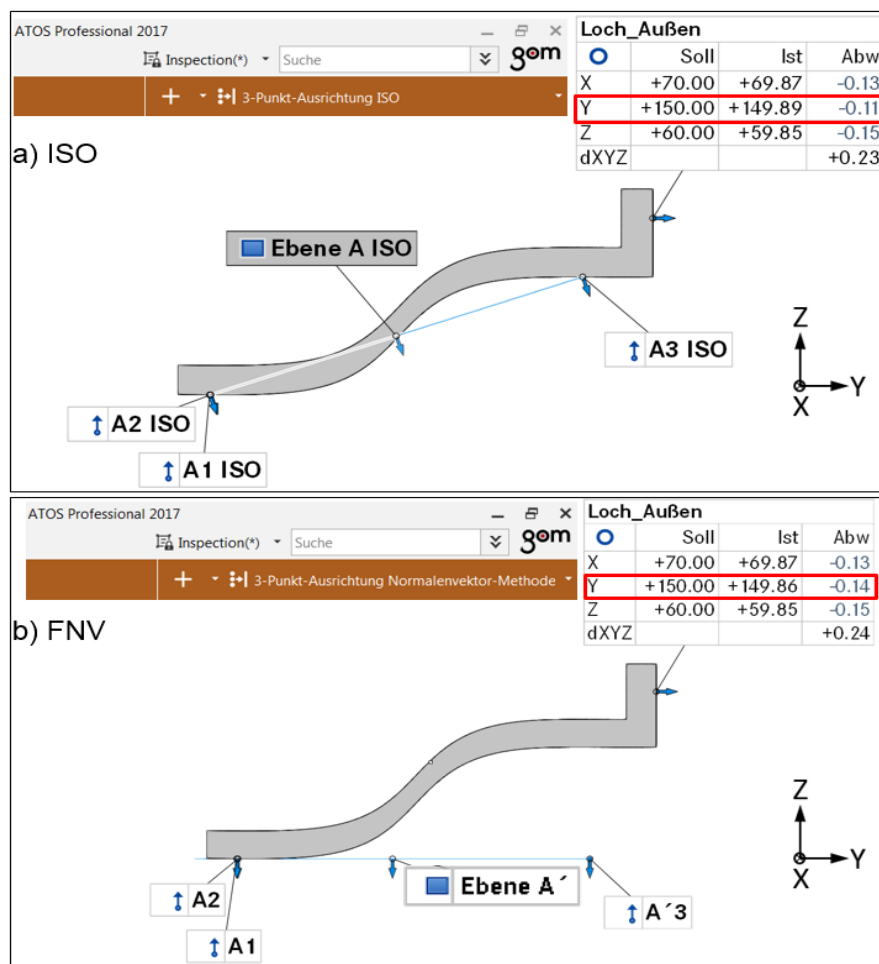


Bild 38 Messergebnisse des Lochs unter der Best-Fit Vorausrichtung. a) nach ISO-Methode und b) nach FNV-Methode

Dieses Kapitel ist wichtig für den Aufbau eines funktionsbasierten Bezugssystems, da die primäre Bezugsebene die Richtungen des sekundären Bezugs direkt und des tertiären Bezugs

indirekt einschränkt. Die neu entwickelte Methode zum Aufbau eines Bezugssystems wird in Kapitel 6 detailliert beschrieben.

4.1.2 Bezug aus zwei Flächen

Dieses Kapitel beschreibt den Aufbauprozess der Bezugsebene aus zwei Freiformflächen. Das entsprechende Defizit von ISO 5459 wurde in Bild 6 beschrieben. Bild 39 stellt dazu die gesamte Systematik dar.

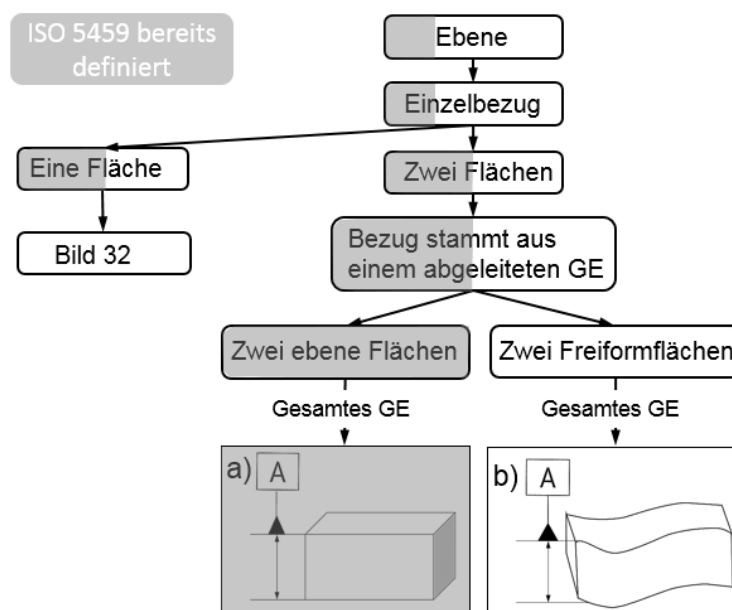


Bild 39 Gesamte Systematik für den Aufbau einer Ebene als Bezug aus zwei Flächen

Die virtuelle Mittelebene als Bezug hat in der Praxis nur Nachteile, da diese physikalisch schwer aufzunehmen ist. Die Funktion einer Mittelebene ist die Einschränkung der Freiheitsgrade eines Bauteils. Das kann durch die aufgebaute Bezugsebene aus einer Bauteiloberfläche ersetzt werden. Bild 40 zeigt die drei Bezugsstellen, welche auf der Bauteiloberfläche liegen. Die FNV-Methode kann in diesem Fall verwendet werden, um die Bezugsebene aufzubauen.

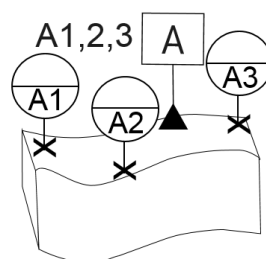


Bild 40 Aufbau der Bezugsebene für ein Bauteil mit zwei Freiformflächen.

4.2 Gerade als Bezug

Dieser Abschnitt beschreibt den Aufbau einer theoretisch-exakten, eindimensionalen Sollgeometrie - Geraden [227] als Einzelbezug, welche aus dem GE - Linie entstanden ist. Diese Linie darf nach ISO 5459 gerade, kreisförmig oder eine Kurve beliebiger Gestalt sein. Dieser Abschnitt bietet eine neue vollständige Systematik zum Aufbau einer Bezugsgeraden an, um die Definitionslücken von ISO 5459 (siehe Kapitel 2.1.2.1) auszufüllen und dabei die ISO 5459 zu erweitern und zu ergänzen.

Bild 41 zeigt die neue Systematik zum Aufbau der Bezugsgeraden. Analog zur Bezugsebene wird eine Bezugsgerade ebenfalls in Einzelbezug und gemeinsamen Bezug unterteilt. Ein Einzelbezug kann je nach Herkunft des Bezugs in „Linie auf einer Fläche“ und „abgeleitetes GE – Achse und Mittellinie“ unterteilt werden. Bei „Linie auf einer Fläche“ wird je nach Form der Linie zwischen gerader Linie und gekrümmter Kurve unterschieden. Diese werden in Kapitel 4.2.1 und 4.2.2 detailliert beschrieben. Für den Fall, dass der Bezug eine Achse oder eine gekrümmte Mittellinie ist, findet sich die detaillierte Beschreibung in Kapitel 4.2.3 und 4.2.4.

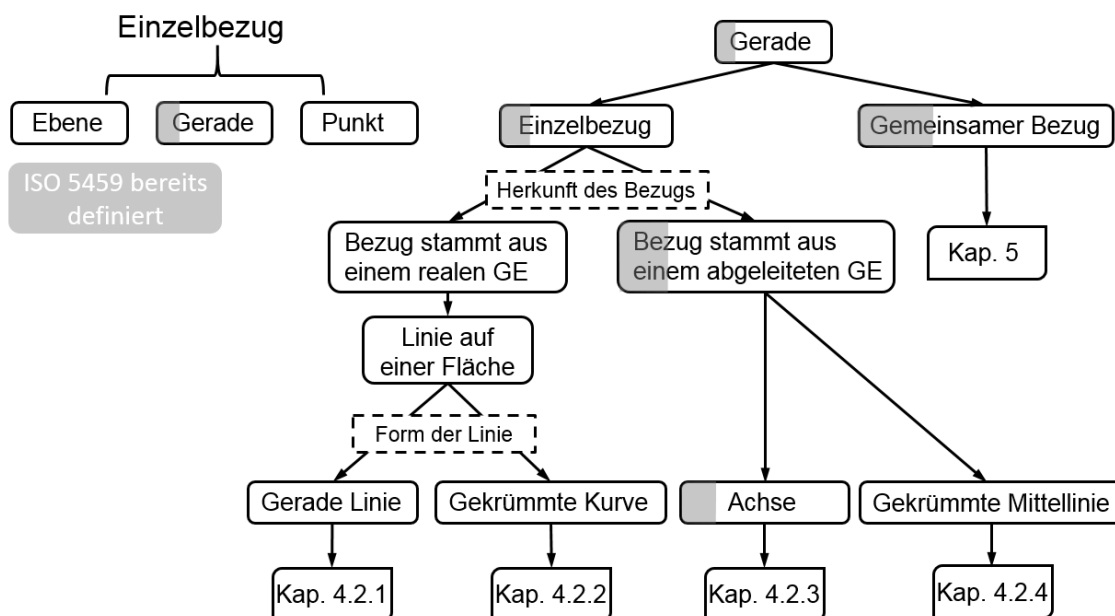


Bild 41 Gesamte Systematik für den Aufbau einer Geraden als Bezug

4.2.1 Bezug für eine reale gerade Linie auf einer Fläche

In ISO 5459 wird nur eine Achse als Bezugsgerade betrachtet. Für das Bezugselement, das aus einem realen GE stammt, z.B. eine Linie auf einer Fläche, gibt es keine Definitionen oder

Beispiele. Dieses Kapitel beschreibt die Theorie zum Aufbau einer Geraden als Bezug für eine gerade Linie auf einer Fläche.

Bild 42 stellt dazu die gesamte Systematik dar. Eine gerade Linie kann in eine „offene oder eine geschlossene Linie“ unterteilt werden. Den Begriff „geschlossene Linie“ gibt es nicht, strenggenommen wird diese als „4 linienförmiges GE“ bezeichnet, welches in Kapitel 4.2.4 als Sonderfall behandelt wird. Eine offene Linie kann wiederum nach der Herkunft des Bezugs unterteilt werden: Linie aus einer gesamten Fläche oder Linie aus einem Teil einer Fläche. Wenn eine Linie aus einer gesamten Fläche stammt, muss das Bezugselement (Linie) nach der ISO 5459 Regel mit nur einem Bezugssymbol auf der gesamten Fläche gekennzeichnet werden (siehe Bild 42a). Diese Schreibweise bringt Missinterpretationen mit sich, da das Bezugssymbol A die gesamte Fläche impliziert, obwohl der Konstrukteur nur auf eine Linie auf dieser Fläche hinweisen möchte. Deswegen sollte auf diese Schreibweise verzichtet werden.

Für den zweiten Fall, wenn eine Linie aus einem Teil einer Fläche stammt, wird eine Bezugsstelle auf dieser Fläche verwendet, um die Bezugsgerade aufzubauen. Bild 42b zeigt zwei punktförmige Bezugsstellen A1 und A2. Bezugsgerade A ist eine gerade Linie, welche direkt durch A1 und A2 gebildet wird. Flächenförmige Bezugsstellen besitzen theoretisch dieselbe Funktion wie punktförmige Bezugsstellen. Deswegen wird auf die Darstellung der flächenförmigen Bezugsstelle, zum Zweck der besseren Übersichtlichkeit in dieser Arbeit verzichtet. Die entstehende Bezugsgerade A kann die Y-Translation und Z-Rotation des Bauteils einschränken. Die Bezugsgerade kann ebenfalls mit einer linienförmigen Bezugsstelle A1 in Bild 42c aufgebaut werden.

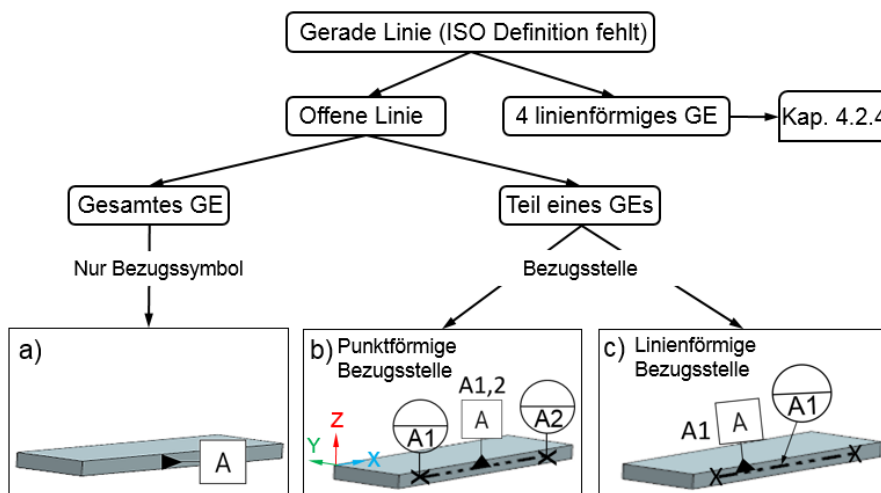


Bild 42 Neue Systematik für den Aufbau einer Geraden als Bezug für eine gerade Linie auf einer Ebene

4.2.2 Bezug für eine offene gekrümmte Kurve auf einer Fläche

Dieser Abschnitt beschreibt den Bezug für eine gekrümmte Kurve auf einer Fläche. Bild 43 zeigt dazu die gesamte Systematik. Eine gekrümmte Kurve kann in eine offene und geschlossene Kurve unterteilt werden. Der Bezug für eine geschlossene Kurve wird in Kapitel 4.2.4 beschrieben.

Analog zu Bild 42 kann die Herkunft der offenen Kurve in eine gesamte Fläche und einen Teil einer Fläche unterteilt werden. Bild 43a stellt die Kennzeichnung des Bezugs mit einem Bezugssymbol A auf der gesamten gewölbten Fläche dar. Auf diese Schreibweise sollte, wie bereits beschrieben, verzichtet werden, da sie nicht auf eine Kurve sondern auf die gesamte Fläche zeigt. Das führt zu Missinterpretationen. Für den zweiten Fall, wenn die offene Kurve aus einem Teil einer Fläche stammt, sollen Bezugsstellen verwendet werden. Bild 43b zeigt zwei punktförmige Bezugsstellen. Das Bezugselement ist die gestrichelte Linie zwischen A1 und A2. Nach ISO 5459 darf der Bezug nur aus einer Ebene, einer Geraden, einem Punkt oder einer Kombination dieser bestehen. Deshalb kann eine Kurve selbst kein Bezug sein. Es kann zwar aus den zwei punktförmigen Bezugsstellen eine Gerade als Bezug abgeleitet werden, jedoch entspricht diese Gerade nicht der Funktion einer Kurve. Diese Kurve schränkt 5 Freiheitsgrade, außer der X-Translation des Bauteils, ein. Wenn das Bauteil unterschiedliche Schnittebenen in Richtung YZ-Ebene besitzt, kann die Kurve alle 6 Freiheitsgrade einschränken. Gemäß der ISO 5459 Invarianzklassen gibt es keine entsprechende Invarianzklasse für ein solches Bezugselement (Kurve). Der Lösungsvorschlag zu der Frage, wie der Bezug für eine offene Kurve auf einer Fläche ist, lautet: es kann kein Bezug aus einer offenen Kurve als Bezugselement gebildet werden. Wenn ein Bezug eines solchen gewölbten Bauteils erforderlich ist, kann dieses Bauteil mit mehreren einzelnen Bezügen (z.B. Bezugsebenen von Seitenwand, Vorderwand und Unterebene) definiert werden. Das gleiche Bauteil kann mit linienförmiger Bezugsstelle A1 in Bild 43c gekennzeichnet werden. Der Bezug aus einer Kurve kann ebenfalls nicht definiert werden.

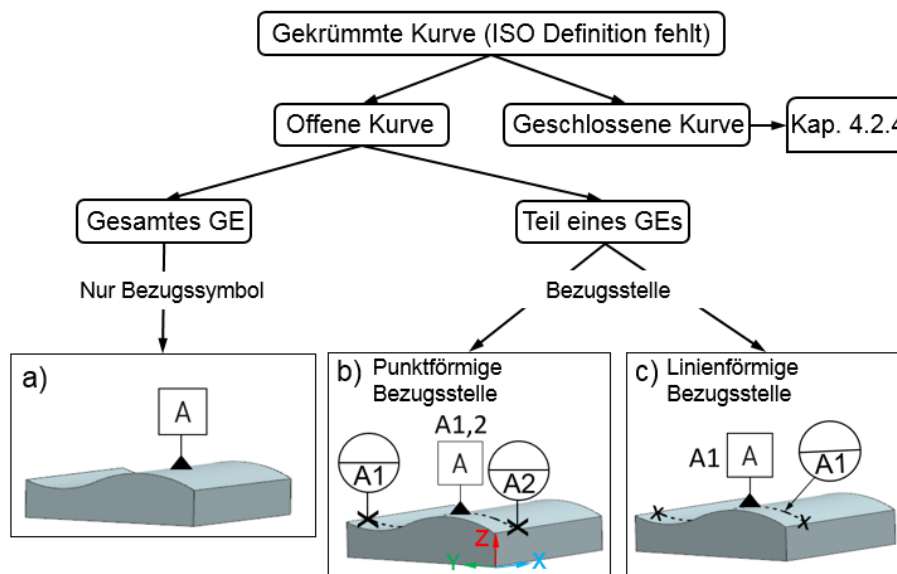


Bild 43 Neue Systematik für den Aufbau einer Geraden als Bezug für eine offene Kurve auf einer Fläche

4.2.3 Achse als Bezug

In diesem Kapitel wird die Achse eines Zylinders als Beispiel betrachtet, um die gesamte Systematik zum Aufbau einer abgeleiteten Geraden als Bezugsgerade darzustellen (Bild 44). Eine Bezugsachse kann entweder mit nur einem Bezugssymbol oder mit Bezugsstellen gekennzeichnet werden. Das ISO Beispiel (Bild 44a) und sein Defizit wurden in Kapitel 2.1.2.1 beschrieben. Bild 44b bietet eine funktionsbasierte Zeichnungsweise der Bezugsachse in einem 3D-Datensatz eines CAD Programms. Aufgrund der Updatestabilität der Achse, wird das Bezugssymbol A direkt mit Verbindung der Achse angeheftet. Die Bezugsachse wird hervorgehoben, wenn das Bezugssymbol mit einer Maus angeklickt wird. Wenn der Durchmesser oder die Position des Zylinders geändert wird, dann ändert sich die Position des Bezugssymbols automatisch mit. Das ist ein großer Vorteil. Diese Zeichnungsweise ist eine Erweiterung von ISO für die 3D Tolerierung.

Die Bezugsachse kann auch mit Bezugsstellen gekennzeichnet werden. Eine Bezugsstelle kann in eine punktförmige (oder flächenförmige) oder linienförmige Bezugsstelle unterteilt werden. Auf Basis von ISO 5459 (Bild 7) müssen die fixierten Bezugsstellen für den Aufbau der Bezugsachse verwendet werden. Um die Achse als Bezug aufzunehmen, werden mindestens zwei Punkte aus der Achse benötigt. Die zwei Punkte können jeweils nach ISO Definition durch die fixierten Bezugsstellen A1-A4 und A5-A8 von der Bauteiloberfläche aufgefasst werden (Bild 44c). Jedoch funktioniert die ISO Theorie mit der fixierten Bezugsstelle nicht, der Grund

wurde bereits in Kapitel 2.1.2.1 beschrieben. Folglich sollte das Bauteil mit beweglichen Bezugsstellen aufgenommen werden (Bild 44d). Dieser Vorschlag wurde von ISO/DIS 5459: 2017-12 aufgenommen [19]. Die Richtung des Pfeils von dem Modifikator der beweglichen Bezugsstelle weist auf die Bewegungsrichtung hin. Das reale Bauteil kann immer durch die beweglichen Bezugsstellen aufgefasst werden. Bei dem Fall mit Anwendung der linienförmigen Bezugsstellen für die Aufnahme des Zylinders (Bild 44e) funktioniert die ISO Theorie mit fixierten Bezugsstellen aus demselben Grund nicht. Bild 44f stellt den Lösungsvorschlag dar [239].

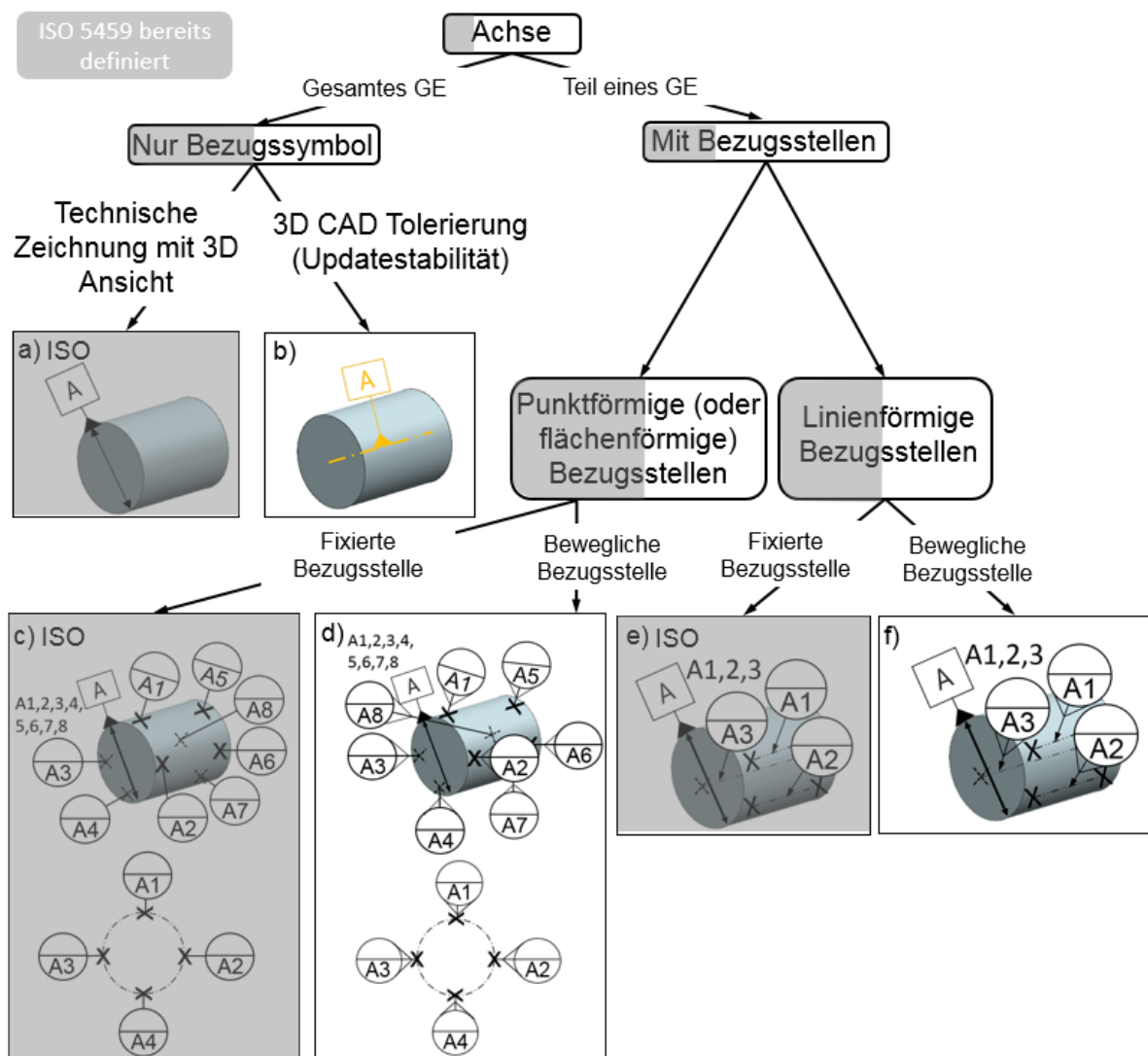


Bild 44 Neue Systematik für den Aufbau einer Achse als Bezug für einen Zylinder

4.2.4 Bezug für ein Geometrieelement aus vier Linien, einer geschlossenen Kurve und einer gekrümmten Mittellinie

Auf Basis des Denkmodells – Herkunft des Bezugselements, tauchen die folgenden Fälle automatisch auf: „geschlossene“ Gerade, geschlossene Kurve und eine gekrümmte Mittellinie. Bild 45 zeigt dazu die gesamte Systematik.

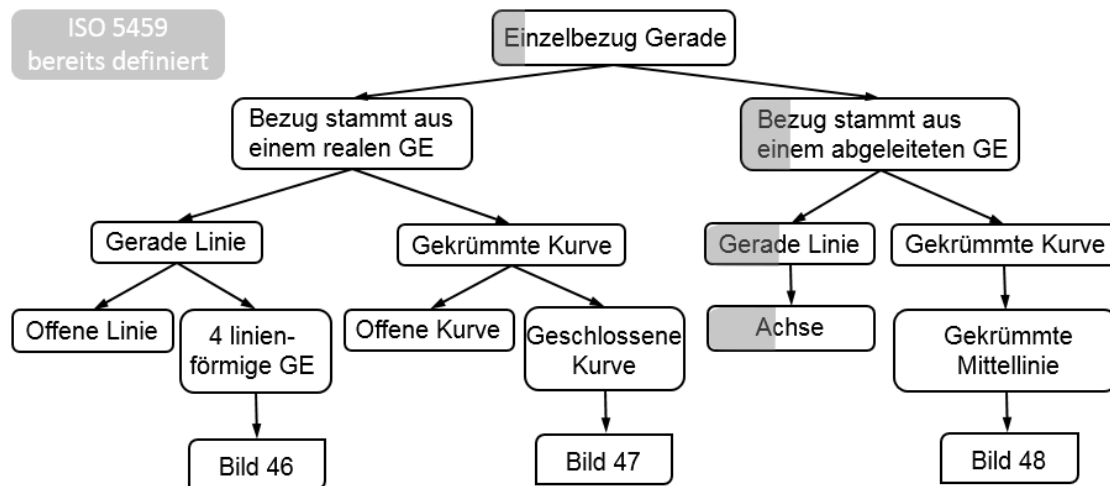


Bild 45 Gesamte Systematik einer Geraden als Einzelbezug

Bild 46 zeigt die neue Systematik zum Aufbau der Bezüge für die 4 linienförmigen GE. Je nach Herkunft der 4 linienförmigen GE kann in gesamte 4 Linien und 4 Linien als Teil einer Fläche unterteilt werden. Bild 46a zeigt ein Bezugssymbol A auf der gesamten oberen Ebene, jedoch kann das Bezugssymbol A nicht auf die 4 Linien der 4 Seitenebenen hinweisen. Deswegen ist diese Schreibweise nicht geeignet. Wenn die 4 linienförmigen GE aus einem Teil einer Fläche stammen, kann in zwei Fälle unterteilt werden: 1. bewegliche punktförmige Bezugsstellen (Bild 46b); 2. bewegliche linienförmige Bezugsstellen (Bild 46d), um die Bezüge der 4 linienförmigen GE aufzubauen.

In Bild 46b sind die vier Linien als Bezugselemente mit 8 beweglichen punktförmigen Bezugsstellen auf vier verschiedenen Ebenen gezeichnet. In ISO 5459 ist der zusammengefasste Bezug der 8 Bezugsstellen nicht definiert. Die Bezugsstellen beschränken 5 Freiheitsgrade und lassen nur die X-Translation frei. Es gibt keinen Bezug in ISO, welcher dieser Invarianzklasse entspricht. Deswegen wird eine Kombination von einer primären Bezugsebene A und einer sekundären Bezugsgeraden B gebildet, um dieselben Freiheitsgrade einzuschränken (Bild 46c). Es gibt keinen Einzelbezug für die „geschlossene“ Gerade, sondern eine Kombination von Bezügen. Das Bauteil kann ebenfalls mit vier beweglichen

linienförmigen Bezugsstellen auf den vier Seitenebenen ausgerichtet werden (Bild 46d). Der zusammengefasste Bezug aus den vier linienförmigen Bezugsstellen A1, B1, C1 und D1 wird in ISO nicht definiert. Die Bezugsstellen blockieren dieselben Freiheitsgrade wie in Bild 46b, deshalb kann wiederum ein Bezugssystem aus Bezugsebene A und Bezugsgeraden B aufgebaut werden (Bild 46e).

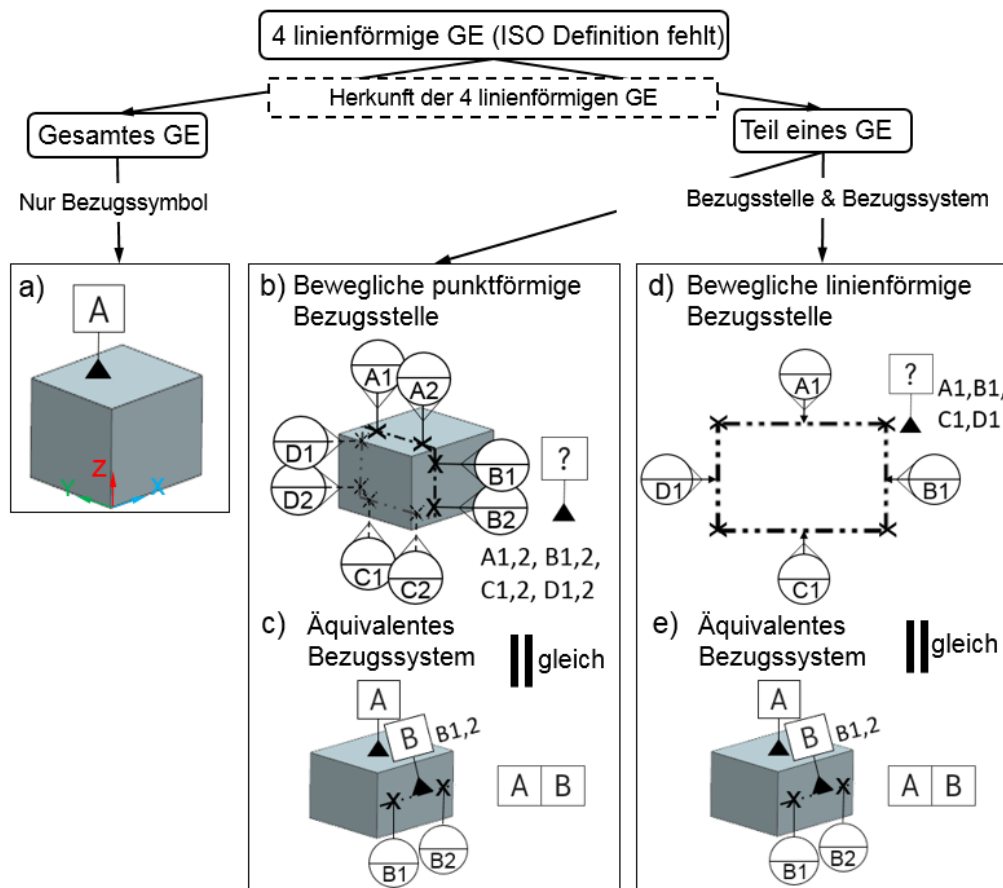


Bild 46 Systematik zum Aufbau der Bezüge für 4 linienförmige GE

Die neue Systematik zum Aufbau der Bezüge für eine geschlossene Kurve befindet sich in Bild 47. Analog Bild 46 kann nach der Herkunft der geschlossenen Kurve zwischen gesamter gewölbter Fläche und Teil einer gewölbten Fläche unterschieden werden. Auf diese Kennzeichnungsweise in Bild 47a wird aus demselben Grund wie in Bild 46a verzichtet. Das Bauteil kann jeweils mit den punktförmigen (Bild 47b) und linienförmigen beweglichen Bezugsstellen (Bild 47c) ausgerichtet werden. Auf Basis von ISO 5459 gibt es keine Definitionen für den zusammengefassten Bezug aus diesen Bezugsstellen. Eine der wichtigsten Funktionen der Bezugsstellen ist, die Freiheitsgrade des Bauteils einzuschränken. Deswegen wird ein Bezugssystem für dieses Bauteil aufgebaut. Das Bezugssystem besteht aus primärer

Bezugsebene A, sekundärer Bezugsgeraden B und tertiärem Bezugspunkt C. Das Bezugssystem blockiert alle 6 Freiheitsgrade des Bauteils und das Denkmodell ist einfach nachzuvollziehen.

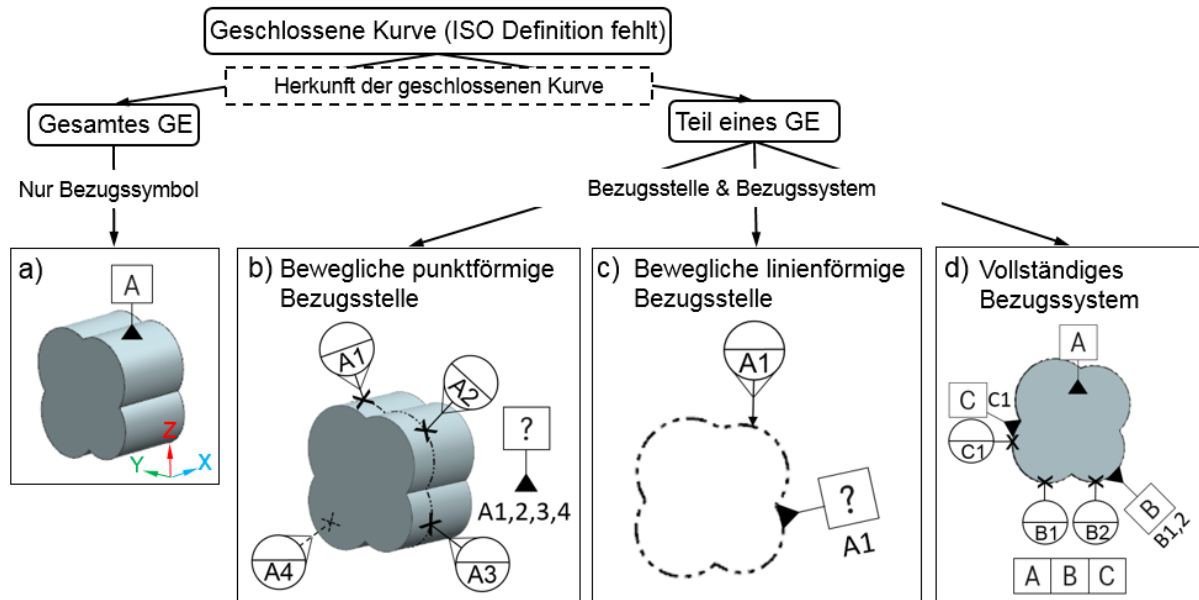


Bild 47 Systematik zum Aufbau der Bezüge für eine geschlossene Kurve

Bild 48 zeigt eine Systematik zum Aufbau der Bezüge für eine gekrümmte Mittellinie. Je nach Herkunft der gekrümmten Mittellinie kann diese in einen kompletten Schlauch und in einen Teil eines Schlauchs unterteilt werden. Bild 48a illustriert eine Kennzeichnung des Bezugs aus komplettem Schlauch mit nur einem Bezugssymbol A. Der Bezug A ist nicht in ISO 5459 definiert. Der Bezug A darf keine gekrümmte Mittellinie sein. Deswegen soll auf diese Zeichnungsweise verzichtet werden. Bei dem Aufbau eines Bezugs eines Teil-Schlauchs können die Bezugsstellen in punktförmig (Bild 48b) und linienförmig (Bild 48c) unterteilt werden. Bild 48b zeigt die 12 beweglichen, punktförmigen Bezugsstellen A1-12. Die 12 Bezugsstellen sind in drei Gruppen, Anfang, Mitte und Ende des Schlauchs, unterteilt und besitzen jeweils vier Bezugsstellen (dies kann auch jeweils mit nur drei Bezugsstellen ausgerichtet werden). Der von den 12 Bezugsstellen zusammengefasste Bezug A ist in ISO 5459 nicht definiert. Die äquivalenten Bezüge oder das Bezugssystem sollen die gleichen Freiheitsgrade wie bei den 12 Bezugsstellen einschränken. Der Schlauch kann ebenfalls mit drei beweglichen, linienförmigen Bezugsstellen (Bild 48c) ausgerichtet werden. Auf Basis der ISO Zeichnungsregel für die 2D kreisförmige Querschnittsdarstellung soll ein Kreuz am Ende der linienförmigen Bezugsstellen gezeichnet werden (siehe unteres Bild vom Bild 48c). Diese Zeichnungsweise könnte mit den punktförmigen Bezugsstellen verwechselt werden. Von daher

lautet der Vorschlag, dass ein Pfeil als Kennzeichnung der linienförmigen Bezugsstellen auf der 2D Zeichnung verwendet werden soll. Der von den drei Bezugsstellen zusammengefasste Bezug A wird nicht in ISO 5459 definiert.

Bild 48d bietet einen Lösungsvorschlag für den Aufbau des Bezugs eines Schlauchs. Statt einen Bezug aufzubauen, soll ein vollständiges Bezugssystem aufgebaut werden. Der primäre Bezug A ist eine Ebene. Sekundäre Bezugsgerade B ist eine virtuelle Gerade, welche aus B1 und B2 entsteht. B1 und B2 sind zwei linienförmige Bezugsstellen, die den Schlauch von unten mit ihrer u-förmigen Form stützen. Nun kann das Bauteil nur um die Mittellinie gedreht werden, weshalb eine Bezugsstelle C1 auf der Oberfläche des Schlauches benötigt wird, um die Drehung zu verhindern. Der Bezugspunkt C wird von der Bezugsstelle C1 gebildet. Durch das vollständige Bezugssystem kann das Bauteil im Raum fixiert werden. Es kann logischerweise kein Einzelbezug aus der gekrümmten Mittellinie abgeleitet werden, ein vollständiges Bezugssystem wird als Vorschlag für den Aufbau der Bezüge für den Schlauch empfohlen.

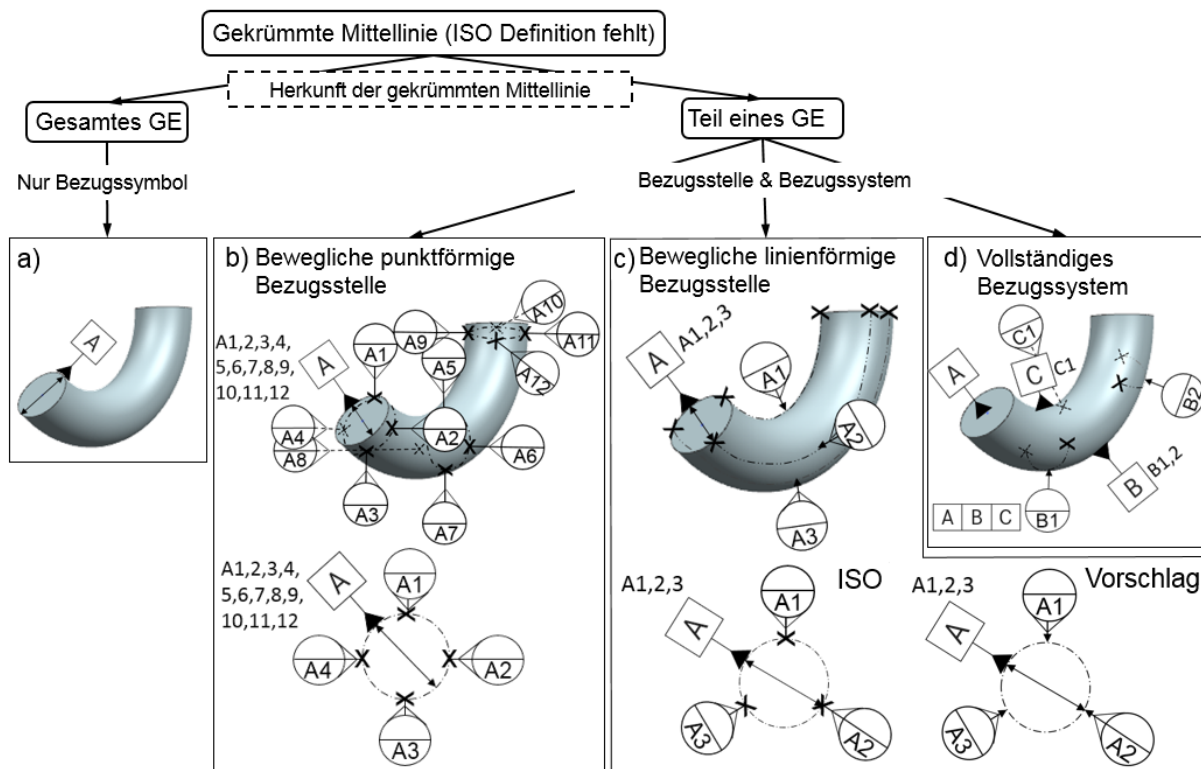


Bild 48 Systematik zum Aufbau der Bezüge für eine gekrümmte Mittellinie

4.3 Punkt als Bezug

Dieses Kapitel beschreibt den Aufbau eines Punktes als Bezug. Für ISO ist der Mittelpunkt einer Kugel der einzige, definierte Bezugspunkt. Bild 49 zeigt dazu die neu entwickelte Systematik. Je nach Herkunft des Bezugs kann wieder in „Punkt auf einer Fläche“ und „abgeleiteter Punkt (Mittelpunkt)“ unterteilt werden.

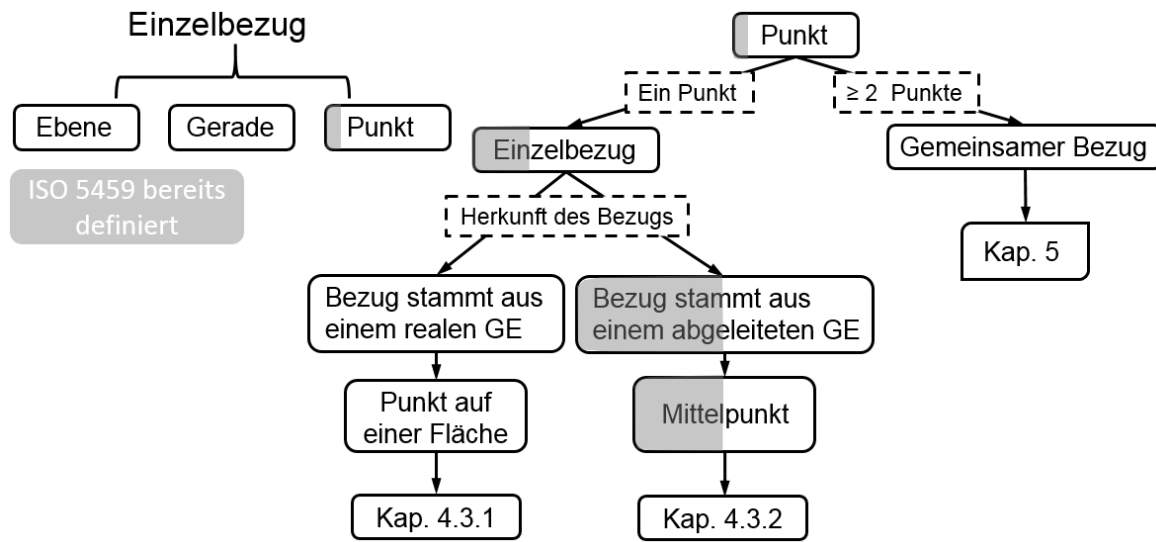


Bild 49 Gesamte Systematik für den Aufbau eines Punktes als Bezug

4.3.1 Bezug für einen Punkt auf einer Fläche

Dieses Kapitel beschreibt den Aufbau des Bezugspunkts auf einer Fläche. Bild 50 zeigt die dazu entwickelte Systematik. Je nach Herkunft des Punkts, kann das Bezugselement in eine gesamte Fläche und einen Teil einer Fläche unterteilt werden. Bild 50a zeigt ein Bezugssymbol A, das auf der Kantenfläche des Leichtbauteils liegt. Statt auf den einzelnen ausgewählten Punkt, weist das Bezugssymbol A auf die gesamte Fläche hin. Deshalb kann auf diese Schreibweise verzichtet werden. Der ausgewählte Punkt kann nun nur mit einer Bezugsstelle gekennzeichnet werden (Bild 50b). Bezugsstelle A1 zeigt den ausgewählten Punkt als Bezugselement. Bezugssymbol A wird direkt neben A1 gekennzeichnet und bedeutet, dass der Bezug ein Punkt ist. Wie genau das Bezugssymbol in diesem Fall in einer Zeichnung gekennzeichnet werden soll, ist in den ISO GPS Normen nicht definiert. Bild 50c zeigt eine andere Schreibweise, wobei das Bezugssymbol A mit einer Hilfslinie direkt mit der Bezugsstelle verbunden ist.

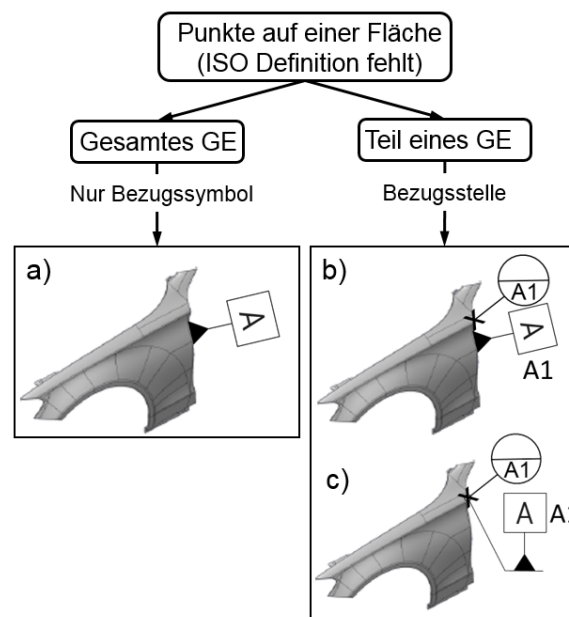


Bild 50 Neue Systematik für den Aufbau eines Bezugs für einen Punkt auf einer Fläche

4.3.2 Bezug für eine Kugel

Dieses Kapitel beschreibt den Aufbau des Punkts als Bezug aus einem abgeleiteten GE. Das Bezugselement ist eine Kugel und ihr abgeleitetes GE ist ihr Mittelpunkt. Bild 51 zeigt die dazu neu entwickelte Systematik. Bild 51a ist die ISO Darstellung des Mittelpunkts als Bezug aus der gesamten Kugel. Wenn die Kugel mit Bezugsstellen gekennzeichnet wird, ist dies in ISO 5459 nicht definiert. Bild 51b zeigt dazu einen Vorschlag. Die Kugel wird mit mindestens 4 beweglichen, punktförmigen Bezugsstellen ausgerichtet. Es gibt jeweils drei Bezugsstellen A2-A4 auf dem unteren Teil und eine Bezugsstelle A1 auf dem oberen Teil der Kugel, um die Kugel fest im Raum auszurichten. Es kann ebenfalls durch bewegliche, flächenförmige Bezugsstellen ersetzt werden, jedoch nicht mit linienförmigen Bezugsstellen, da es viele Umstände und keine Vorteile bringt. Es gibt auch andere Möglichkeiten, um die Kugel im Raum festzulegen, z.B. die Verwendung der 6 beweglichen, punktförmigen Bezugsstellen, die jeweils paarweise auf den 6 äußersten symmetrischen Punkten der Kugel gekennzeichnet sind. Wenn der Mittelpunkt in einem CAD Programm gezeichnet wird (Bild 51c), soll aufgrund der Updatestabilität die Bezugsstelle A1 direkt mit dem Mittelpunkt verbunden werden. Das Ende einer Bezugslinie von einer punktförmigen Bezugsstelle soll nach ISO immer ein Kreuz sein. Dennoch wird in einem CAD Programm (z.B. Siemens NX) bewusst ein Pfeil verwendet, da ein Pfeil auf die genaue Position zeigen kann und anwendungsstabil ist. In Bild 51c wurde das

Bezugssymbol A absichtlich weggelassen, da es keine wesentliche Bedeutung in der Praxis hat. Das bewusste Weglassen des Bezugssymbols vereinfacht die 3D - Darstellung.

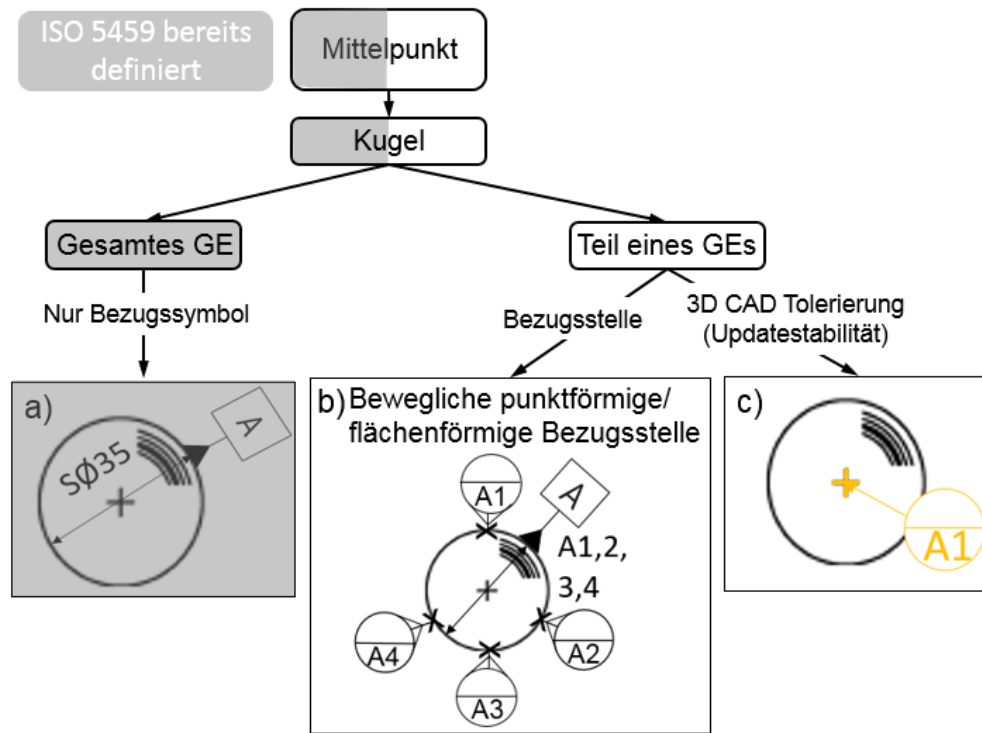


Bild 51 Gesamte Systematik für den Aufbau eines Mittelpunkts als Bezug für eine Kugel

4.4 Bezug für einen Durchbruch

In Kapitel 2.1.2.1 wurde bereits beschrieben, dass in ISO GPS Normen keine Definition für den Bezug für einen Durchbruch vorhanden ist. Daher wird in diesem Kapitel der Bezug für einen Durchbruch beschrieben. Die in diesem Kapitel vorgeschlagene Methode und Kennzeichnungsweise wurden auf Basis der Grunddefinition der ISO GPS Normen entwickelt. Diese Arbeit verwendet die in ISO bereits definierten Sprachensymbole, um die Definitionslücken abzudecken. Bild 52 zeigt eine Systematik zur Unterteilung der Durchbrüche. Je nach Einschränkung der Translation von Freiheitsgraden, kann zwischen 4-Wege-Durchbruch und 2-Wege-Durchbruch unterschieden werden.

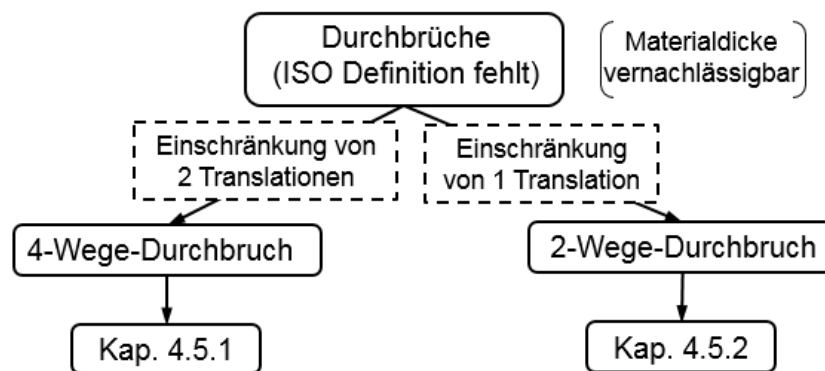


Bild 52 Systematik zur Unterteilung der Durchbrüche

4.4.1 Bezug für einen 4-Wege-Durchbruch

Dieses Kapitel bietet einen Lösungsansatz an, um einen Bezug für einen 4-Wege-Durchbruch zu bilden. Es gibt theoretisch unendlich viele verschiedene Durchbrüche. In diesem Kapitel werden die in der Praxis am meisten gebrauchten Durchbrüche als Beispiele verwendet, um die neu entwickelte Systematik zu erläutern (Bild 53). Je nach Herkunft des Bezugs kann in reale Mantelfläche und abgeleitetes GE (Bild 54) unterteilt werden. Für einen Bezug aus einer realen Mantelfläche kann die Mantelfläche nur mit einem Bezugssymbol verwendet werden. Als Beispiele werden die vier folgenden Durchbrüche explizit beschrieben, um ihren Bezug aufzubauen: Rundloch, Langloch, Vierkantloch und Schlüsselloch.

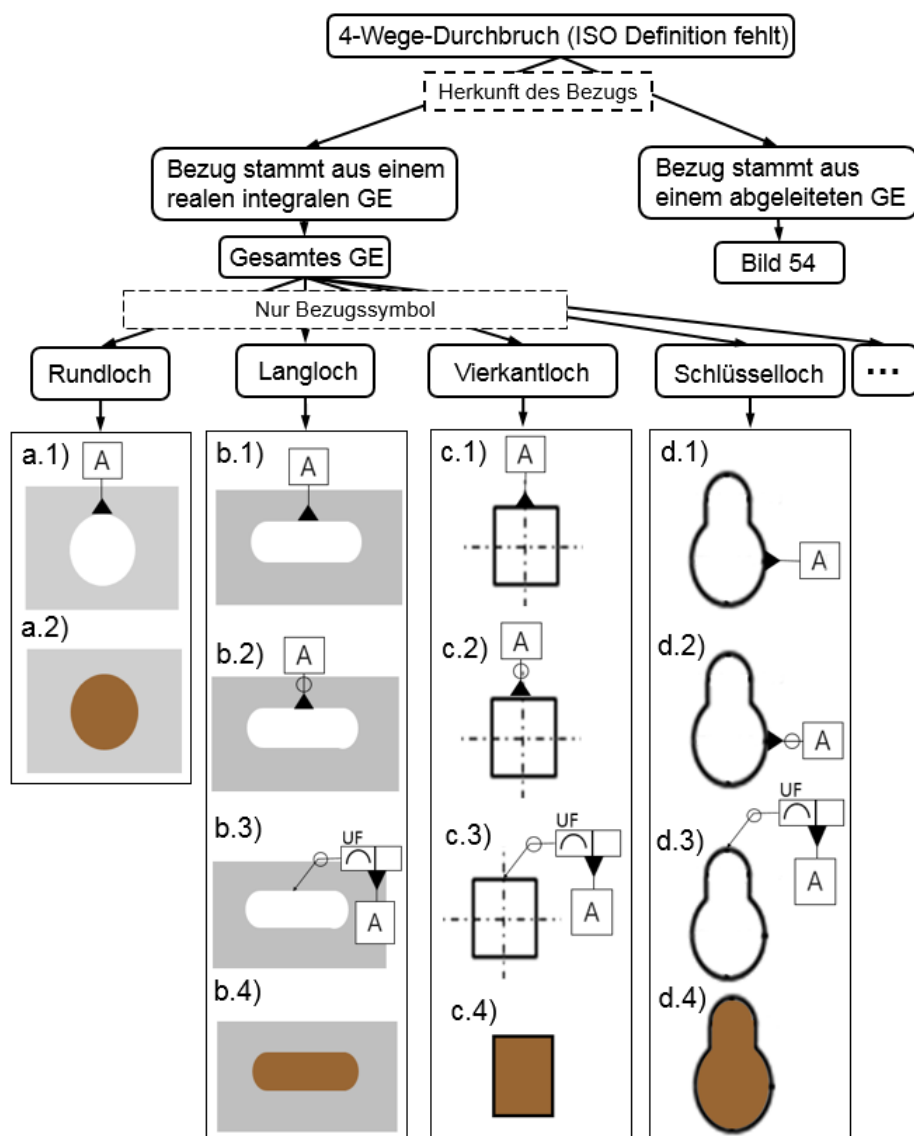


Bild 53 Gesamte Systematik zum Aufbau eines Bezugs für einen 4-Wege-Durchbruch aus einer Mantelfläche

Bei einem Rundloch (Bild 53a.1) ist das Bezugssymbol A auf der Mantelfläche gekennzeichnet. Das bedeutet, dass der Bezug die Mantelfläche ist. In der Praxis wird dieser Bezug mit einem zylindrischen Bolzen verwendet (Bild 53a.2). In ISO 5459 ist nicht definiert, ob ein Bezug eine Mantelfläche ist und aus welchem Situationselement der Bezug besteht. Theoretisch, wenn der Bolzen und das Loch perfekte GE wären, könnte der Bolzen komplett in dem Loch stecken und es werden alle Punkte von der Mantelfläche berührt. Der entsprechende Bezug ist logischerweise die Mantelfläche. Jedoch sind der Bolzen und das Loch in der Realität keine perfekten GE. Der Bolzen sollte kleiner sein als der Durchmesser des Lochs, damit der Bolzen in das Loch passt. Daher kann der Bolzen mit nur einem Punkt die Mantelfläche

berühren. Aus diesem Grund ist der Bezug einer Mantelfläche ein einziger Punkt. Die Position des berührten Punkts kann nicht vorher definiert werden, daher kann ebenso keine technische Zeichnung mit konkreter Position des Bezugspunkts im Voraus erstellt werden. Als Ergebnis ist der Bezug für ein gesamtes Loch entweder die komplette Mantelfläche oder ein Punkt auf der Mantelfläche.

Die gleiche Vorgehensweise gilt ebenfalls für ein Langloch (Bild 53b), Vierkantloch (Bild 53c) und Schlüsselloch (Bild 53d). Jedoch kann das einzige Bezugssymbol A nicht die komplette Mantelfläche der drei Löcher kennzeichnen, da das Bezugssymbol nur auf ein GE zeigen darf. In Bild 53b.1 und Bild 53c.1 zeigt das A nur auf eine Linie und in Bild 53d.1 nur auf einen Kreis. Deswegen wird ein neues Sprachsymbol (die Kombination von einem Kreis mit einem Bezugssymbol) in Bild 53b.2, Bild 53c.2 und Bild 53d.2 vorgeschlagen. Eine Alternative ist eine Kombination mit dem Rundum-Symbol und dem Modifikator UF (vereinigtes Geometrieelement) bei einer Linienprofil- (bei dünner Wanddicke) oder Flächenprofiltoleranz. Die Bilder 53b.3, 53c.3 und 53d.3 stellen diese Kombination dar. Die Praxisanwendungen eines Bezugs mit einem gleichförmigen Gegenstück wie beim Loch sind in Bild 53b.4, Bild 53c.4 und Bild 53d.4 illustriert.

Bild 54 zeigt die neu entwickelte Systematik zum Aufbau eines Bezugs für einen 4-Wege-Durchbruch mit sehr dünner Wanddicke, welcher aus einem abgeleiteten GE stammt. Die Systematik wird mit denselben 4 Durchbrüchen als Beispiel analysiert. Beim Aufbau des Bezugs kann je nach Herkunft des abgeleiteten GE in gesamtes GE (mit nur einem Bezugssymbol) und Teil eines GE (mit Bezugsstelle) unterteilt werden.

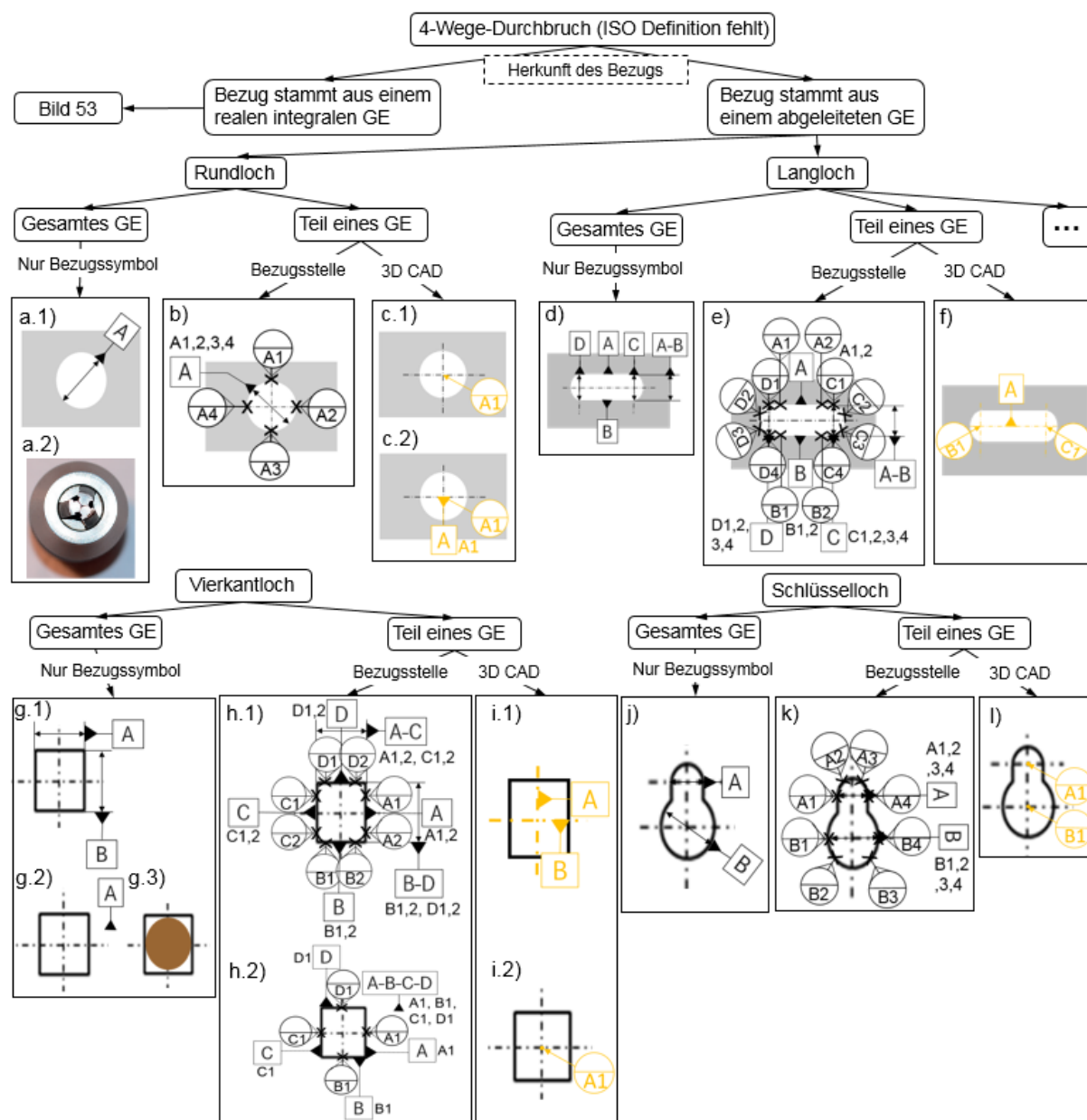


Bild 54 Gesamte Systematik zum Aufbau eines Bezugs für einen 4-Wege-Durchbruch, dessen Bezug aus einem abgeleiteten GE stammt, a.2) siehe Literaturquelle [4]

Bild 54a.1 zeigt die Kennzeichnung eines Bezugs für ein Rundloch mit einem Bezugssymbol A und einem Doppelmaßfeil. Der Bezug ist der Mittelpunkt. In ISO 5459 wird nur eine Achse als Bezug für eine Bohrung definiert. Ein Loch mit sehr dünner Wanddicke wird nicht in ISO 5459 definiert. Der Mittelpunkt wird in der Praxis mittels eines Dreibeckenfutters (Bild 54a.2) verwendet [4]. Wenn nur ein Teil eines GE für den Aufbau eines Bezugs benötigt wird, werden Bezugsstellen benutzt. Bild 54b illustriert die Kennzeichnung der vier beweglichen, punktförmigen Bezugsstellen für den Aufbau des Bezugs. Bild 54c.1 und Bild 54c.2 zeigen die beiden Möglichkeiten der Symbole in einem CAD Programm. Diese

Zeichnungsweisen sind updatestabil. Das Bezugssymbol A und die Notiz A1 haben keine tatsächliche Bedeutung in der Praxis. Deswegen können diese weggelassen werden (Bild 54c.2).

Bild 54d zeigt die Bezüge für ein Langloch. Bezugssymbole A und B sind auf der oberen und unteren Gerade des Langlochs gekennzeichnet. Der gemeinsame Bezug A-B ist deren mittlere Gerade. Bezug C und D sind jeweils der Mittelpunkt des Halbkreises. Insgesamt werden drei Bezüge für das 4-Wege-Langloch definiert. Die mittlere Gerade kann mittels einer aktiven Vermittlung in der Praxis und der Mittelpunkt mittels eines Dreibackenfutters realisiert werden. Bild 54e zeigt die Verwendung der 12 beweglichen, punktförmigen Bezugsstellen von dem Teil eines Langlochs, um die drei Bezüge des Langlochs aufzubauen. Bild 54f zeigt die updatestabile Kennzeichnung dieser Bezüge in einem CAD Programm.

Bild 54g.1 zeigt das Vierkantloch mit zwei mittleren Geraden A und B als Bezüge. Die mittlere Gerade kann mittels einer aktiven Vermittlung in der Praxis ausgerichtet werden. In Bild 54g.2 wird versucht, den Mittelpunkt des Vierkantlochs mit einem Bezugssymbol zu kennzeichnen. Jedoch ist die Kennzeichnung nach der ISO Regel nicht möglich. Bild 54i.2 bietet dazu eine Lösung im CAD Programm an. Bild 54g.3 zeigt die theoretische Aufnahme mittels eines Bolzens, um den Mittelpunkt als Bezug umzusetzen. Das Vierkantloch kann ebenfalls mit Bezugsstellen ausgerichtet werden. Der erzeugte Bezug A-C und B-D in Bild 54h.1 ist identisch wie A und B in Bild 54g.1. Der erzeugte Bezug A-B-C-D in Bild 54h.2 bezeichnet den Mittelpunkt. Dennoch kann das Bezugssymbol A-B-C-D nach der ISO Regel nicht in der Zeichnung gekennzeichnet werden. Die Lösung ist eine Verwendung der 3D Kennzeichnung in Bild 54i.2. Bild 54i.1 und zeigt die Kennzeichnung der zwei mittleren Geraden als Bezüge im CAD.

Bild 54j zeigt die zwei Mittelpunkte als Bezüge vom Bezugssymbol A und B für ein gesamtes Schlüsselloch. Bild 54k ist die entsprechende Kennzeichnung der Bezugsstellen. Bild 54l ist die 3D Kennzeichnung für die Mittelpunkte als Bezüge.

4.4.2 Bezug für einen 2-Wege-Durchbruch

Bild 55 zeigt eine neu entwickelte Systematik zum Aufbau eines Bezugs für einen 2-Wege-Durchbruch. Je nach Herkunft des Bezugs kann in reale, integrale Fläche und abgeleitetes GE (Bild 56) unterteilt werden. Unter den vier repräsentativen Durchbrüchen Rundloch, Langloch, Vierkantloch und Schlüsselloch kann nur das Schlüsselloch mit einem einzigen Bezugssymbol

A eine Translation blockieren. Deswegen wird in Bild 55a.1 nur das Schlüsseloch dargestellt. Das Bezugssymbol A zeigt nur auf den kleinen Halbkreis. Das entsprechende halbkreisförmige Gegenstück kann die horizontale Translation blockieren (Bild 55a.2). Der Bezug A ist entweder die Mantelfläche oder ein Punkt der Innenseite der Mantelfläche. Der Grund wurde in Kapitel 4.4.1 erläutert. Für die anderen 2-Wege-Durchbrüche wird analog zu dieser Theorie der Bezug gebildet.

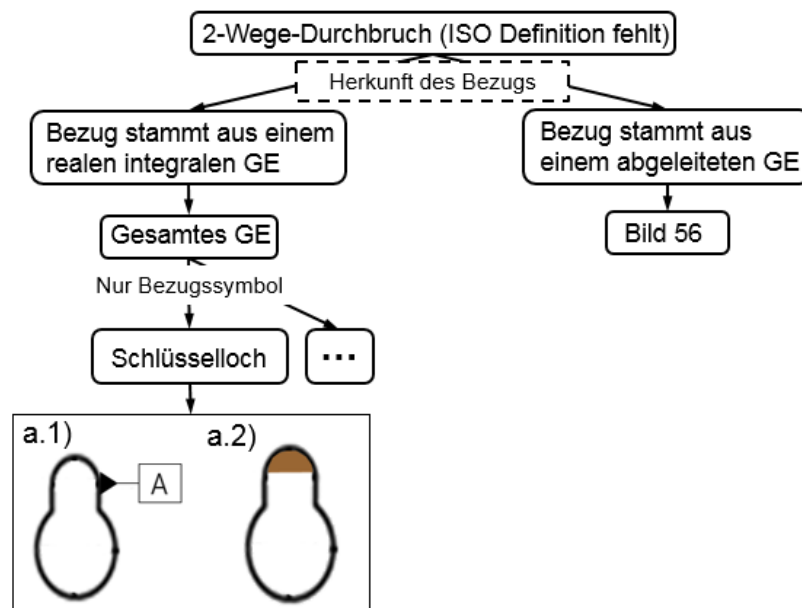


Bild 55 Neue Systematik zum Aufbau eines Bezugs für einen 2-Wege-Durchbruch, welcher aus einer realen integralen Fläche stammt

Bild 56 zeigt die neu entwickelte Systematik zum Aufbau eines Bezugs für die 2-Wege-Durchbrüche, deren Bezüge aus einem abgeleiteten GE stammen. Je nach Herkunft des Bezugs kann in zwei Fälle unterteilt werden: der Bezug stammt entweder aus einem gesamten GE (mit einem Bezugssymbol) oder einem Teil eines GE (mit Bezugsstelle).

Bild 56a.1 zeigt ein Bezugssymbol A mit einem Doppelmaßpfel. Der Bezug A ist die vertikale, mittlere Gerade. Der Bezug A lässt für das Rundloch die vertikale Bewegung zu, die horizontale Bewegung ist dadurch blockiert. Der Bezug in Bild 56a.2 ist die horizontale, mittlere Gerade. Bild 56a.3 zeigt eine Linearführung als Symbolisierung des Bezugs in der Praxis. Durch die Linearführung kann das Rundloch nur in eine Richtung bewegt werden. Ein Rundloch als 2-Wege-Durchbruch kann nicht mit einer Bezugsstelle gekennzeichnet werden (Bild 56b), da die Kennzeichnung mit Bezugsstellen der Intuition widerspricht und potenziell Missverständnisse

erzeugt. Die Bilder 56c.1 und 56c.2 zeigen die entsprechende Darstellung des Bezugs in einem CAD Programm.

Bild 56d.1 zeigt eine Kennzeichnung eines Bezugs für ein Langloch. Der Bezug ist die mittlere Gerade von den oberen und unteren Linien. Eine typische Umsetzung der mittleren Gerade ist die Aufnahme mittels Schwertstift (Bild 56d.2). Das ausgerichtete Langloch kann nur horizontal bewegt werden. Bild 56e zeigt die entsprechenden Bezugsstellen, um den Bezug aufzubauen. Bild 56f.1 stellt die Kennzeichnungsweise der mittleren Gerade in einem CAD Programm dar. Bild 56f.2 zeigt die Bezugsstelle A1, welche direkt mit dem Mittelpunkt des Langlochs verbunden ist. Diese Schreibweise wird nur zusammen mit der „Rundloch-Langloch“ Kombination verwendet.

Die Bilder 56g.1 und 56g.2 zeigen die Kennzeichnung eines Bezugs von dem 2-Wege-Vierkantloch. Der Bezug ist jeweils die vertikale und horizontale mittlere Gerade. Bild 56g.3 zeigt eine typische Aufnahme dieses Bezugs mittels einer Linearführung. Durch die Linearführung kann das Vierkantloch nur in eine Richtung bewegt werden. Das Vierkantloch kann ebenfalls mit 4 beweglichen punktförmigen Bezugsstellen ausgerichtet werden (Bild 56h.1 und Bild 56h.2). Wenn der Bezug in einem CAD Programm gekennzeichnet wird, soll das Bezugssymbol aufgrund der Updatestabilität direkt mit dem Bezug verbunden werden (Bild 56i.1 und Bild 56i.2).

Bild 56j zeigt das Bezugssymbol A mit einem Doppelmaßpfeil auf dem oberen, kleinen Halbkreis. Der Bezug ist der Mittelpunkt des Halbkreises, dessen typische, praktische Umsetzung das Dreibackenfutter oder ein Spreizdorn ist. Bild 56k zeigt die entsprechenden Bezugsstellen für den Aufbau des Bezugs für das Schlüsselloch. Bild 56l zeigt die Darstellung in einem CAD Programm.

Dieses Kapitel analysiert den Bezug für die in der Praxis am häufigsten verwendeten 2-Wege-Durchbrüche. Die neu entwickelte Methode, inklusive der Definitionen und Semantiken, ist auch für andere Durchbrüche verwendbar. Die neue Systematik wird auf Basis des physikalischen Verhaltens des GE aufgebaut. Diese Systematik füllt die Definitionslücken in ISO 5459 und bietet dazu die entsprechenden Lösungsvorschläge.

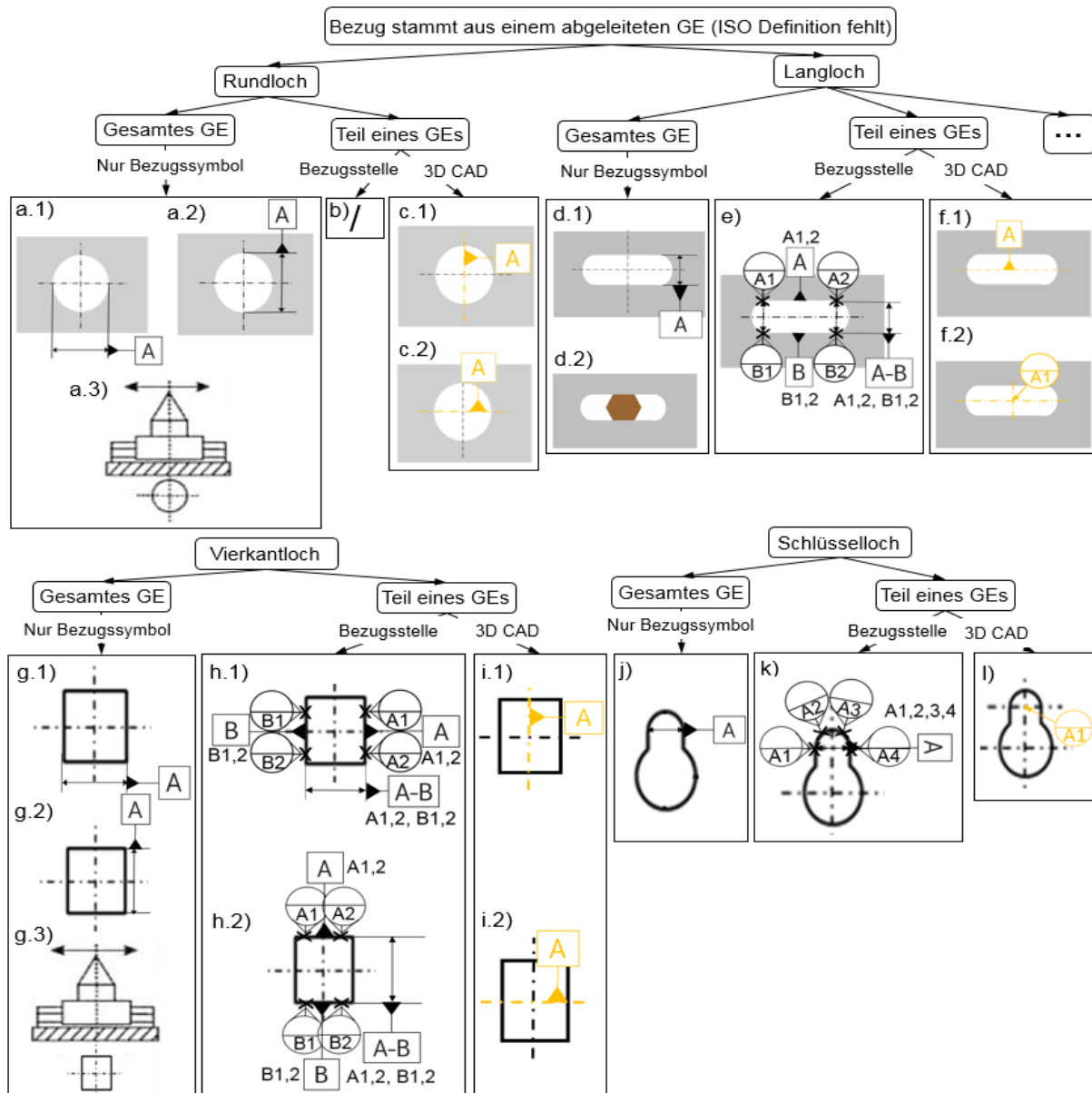


Bild 56 Gesamte Systematik zum Aufbau eines Bezugs für einen 2-Wege-Durchbruch, dessen Bezug aus einem abgeleiteten GE stammt. Bild 56a.3 und Bild 56g.3 siehe Literaturquelle [240].

5 Systematik zum Aufbau eines gemeinsamen Bezugs

Dieses Kapitel beschreibt eine gesamte Systematik zum Aufbau eines gemeinsamen Bezugs. Analog zum Einzelbezug (Ebene, Gerade, Punkt und deren Kombination) kann ein gemeinsamer Bezug wie folgt unterteilt werden: Ebene-Ebene, Gerade-Gerade, Punkt-Punkt und Kombination der verschiedenen GE.

5.1 Ebene - Ebene als gemeinsamer Bezug

Die Definition und die Defizite des gemeinsamen Bezugs Ebene-Ebene wurde bereits in Kapitel 2.1.2.2 beschrieben. Bild 57 zeigt die dazu entwickelte Systematik. Je nach Orientierung der zwei einzelnen Ebenen kann in Parallelität, Rechtwinkligkeit und Winkligkeit unterteilt werden. Bild 57a zeigt den in ISO 5459 bereits beschriebenen Fall.

Bild 57b.1 zeigt zwei senkrecht zueinander stehende Bezugsebenen A und B. Auf Basis von ISO 5459 muss, um einen gemeinsamen Bezug aufzubauen, die Kollektionsfläche in Betracht gezogen werden. Die Kollektionsfläche ist die Halbierungsfläche von A und B (Bild 57b.2), welche mit einem 45° Winkel schräg im Raum steht. Diese schräge Ebene kann nur 3 Freiheitsgrade einschränken. Jedoch können die Bezugsebenen A und B in der Praxis 5 Freiheitsgrade des Bauteils einschränken. Der nach ISO definierte gemeinsame Bezug widerspricht der Realität. Deswegen ist die ISO Methode keine funktionsbasierte Methode. Bild 57b.3 zeigt einen neu entwickelten gemeinsamen Bezug A-B, welcher aus einer horizontalen Ebene (A) und einer Geraden besteht. Die Gerade ist die Schnittlinie von A und B. Der erzeugte Bezug A-B blockiert insgesamt 5 Freiheitsgrade und lässt nur noch einen Freiheitsgrad, verdeutlicht durch den Pfeil, frei. Dieser gemeinsame Bezug entspricht der Realität und ist funktionsfähig. Bild 57b.4 zeigt eine Alternative eines gemeinsamen Bezugs B-A, welche aus einer senkrechten Ebene (B) und einer Gerade (Schnittlinie) besteht. B-A blockiert dieselben Freiheitsgrade wie A-B. Jedoch ist das Denkmodell des Aufbaus des gemeinsamen Bezugs unterschiedlich. In dieser Arbeit wird der gemeinsame Bezug folgendermaßen definiert: die zuerst gekennzeichnete Ebene hat Priorität, das heißt, dass die Richtung der erzeugten Ebene des gemeinsamen Bezugs nach dieser priorisierten Ebene

orientiert werden soll. Bild 57c zeigt zwei schräg zueinander stehende Ebenen. Die Theorie für den Aufbau des gemeinsamen Bezugs kann analog zu Bild 57b für Bild 57c verwendet werden.

Diese Defizite von „Ebene-Ebene“ in Kapitel 2.1.2.2 wurden durch die neu entwickelte Systematik beseitigt. Die Verbesserungen sind wie folgt zusammengefasst:

Verbesserung 1: Die neue Systematik betrachtet alle Situationen von der relativen Orientierung zwischen zwei Ebenen und ist vollständig.

Verbesserung 2: Es gibt Unterschiede in der Reihenfolge der einzelnen Bezüge in einem gemeinsamen Bezug.

Verbesserung 3: Es wurde eine funktionsbasierte Methode für den Aufbau des gemeinsamen Bezugs entwickelt. Das Denkmodell lautet: der gebildete, gemeinsame Bezug soll die gleichen Freiheitsgrade einschränken, wie die einzelnen Bezüge jeweils zusammen einschränken (aufgenommen von ISO/DIS 5459: 2017-12 [19]).

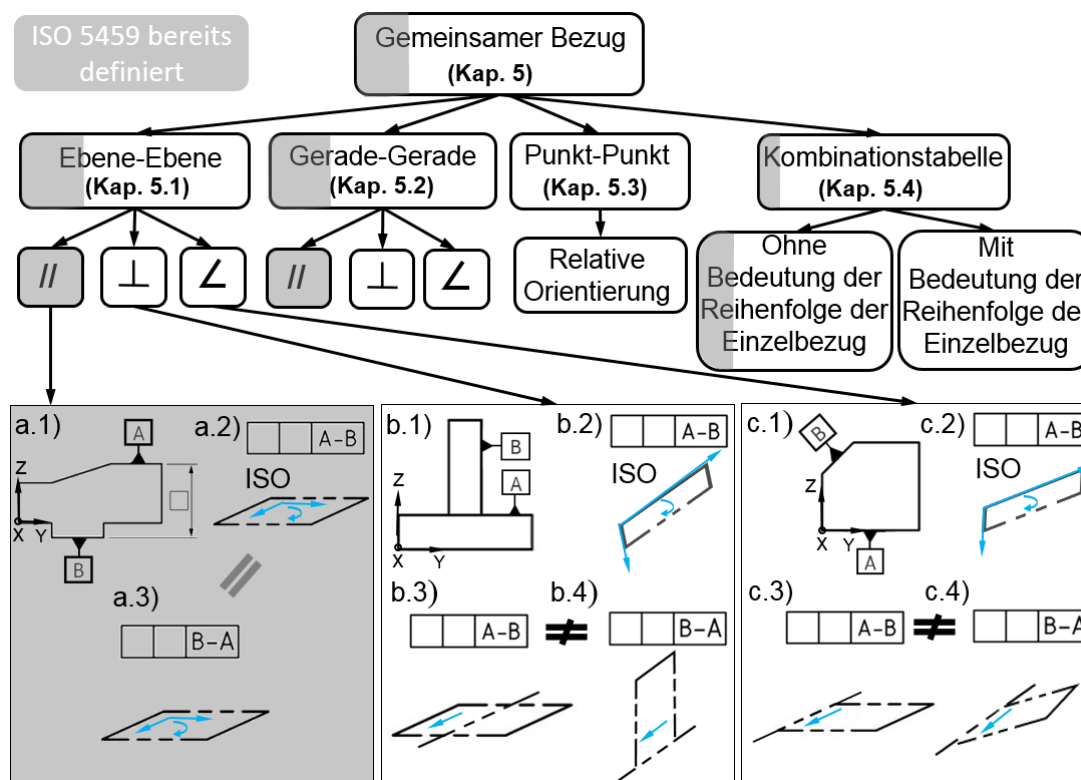


Bild 57 Gesamte Systematik zum Aufbau der Ebene-Ebene als ein gemeinsamer Bezug [241]

5.2 Gerade - Gerade als gemeinsamer Bezug

In Kapitel 4.2 gibt es zwei Bezugsgeraden: Gerade auf einer Ebene und eine Achse. Bild 58 stellt die Unterteilung der Systematik zu „Gerade-Gerade“ als gemeinsamen Bezug dar. Es gibt

insgesamt drei Kombinationen aus diesen zwei Arten von Bezugsgeraden. Diese werden in den folgenden Kapiteln genauer beschrieben.

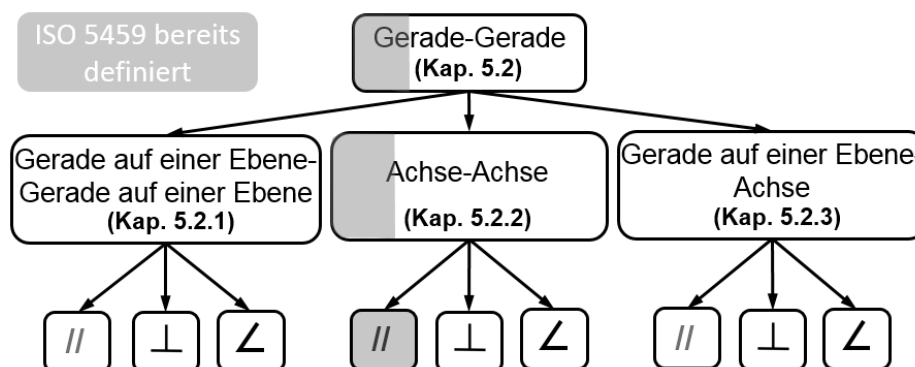


Bild 58 Gesamte Systematik zum Aufbau der Gerade-Gerade als ein gemeinsamer Bezug

5.2.1 Gerade auf einer Ebene - Gerade auf einer Ebene als gemeinsamer Bezug

Wie bereits in Kapitel 2.1.2.2 beschrieben, gibt es keine Definition in ISO 5459 für eine Gerade auf einer Ebene als Bezug. Bild 59 zeigt die dazu neu entwickelte Systematik. Je nach Orientierung der Geraden kann in Parallelität, Rechtwinkligkeit und Winkligkeit unterteilt werden. Bild 59a.1 zeigt die zwei parallelen Bezugsgeraden A und B. Nach der Vorgehensweise (Halbierungsprozess) von ISO 5459 wird die mittlere Gerade von A und B als gemeinsamer Bezug erzeugt. Diese Gerade ist offensichtlich keine Kollektionsfläche. Zusätzlich schränkt die Gerade die 4 Freiheitsgrade des Bauteils ein, was der Realität widerspricht (Bild 59a.2). Das Bauteil kann unter Ausrichtung der einzelnen Bezüge A und B in X- und Z- Richtung bewegt werden und um die Y-Achse rotieren. Der funktionsbasierte, gemeinsame Bezug A-B ist eine Ebene, welche parallel zur XZ-Ebene liegt (Bild 59a.3). A-B entspricht der Realität. Es gibt keine Unterschiede bei der Bedeutung der Reihenfolge der einzelnen Bezüge A-B und B-A (Bild 59a.4).

Bild 59b.1 zeigt zwei senkrecht zueinander stehende Bezugsgeraden A und B. Bild 59b.2 illustriert den nach ISO 5459 erzeugten gemeinsamen Bezug – eine mit 45° Winkel im Raum stehende mittlere Gerade. Diese entspricht nicht der Funktion eines gemeinsamen Bezugs. Unter der Ausrichtung von A und B kann das Bauteil nur entlang der X Richtung bewegt werden und um die Z- oder Y-Achse rotieren (Bild 59b.3). Die drei restlichen, blockierten Freiheitsgrade können nicht durch einen gemeinsamen Bezug, welcher aus einer Kombination der Situationselemente entsteht, beschrieben werden. In der ISO Invarianzklasse gibt es keine

einzelne Kombination, welche diese drei Freiheitsgrade gleichzeitig blockieren kann. Daher müssen mehrere Kombinationen für den Aufbau des gemeinsamen Bezugs verwendet werden. Bild 59b.4 zeigt die äquivalenten Bezüge als gemeinsamen Bezug, welche aus drei Kombinationen der Situationselemente besteht. Die erste Kombination von einem Punkt und einer Geraden in Z-Richtung kann nur um die Z-Achse rotieren. Die zweite Kombination von einer Ebene (YX-Ebene) und einer Geraden (X-Richtung) ermöglicht nur die Translation entlang der X-Achse. Die dritte Kombination von einem Punkt und einer Geraden in Y-Richtung kann nur um die Y-Achse rotieren. Diese drei Kombinationen sind unabhängig voneinander. Zusammen entsprechen die drei Kombinationen den Funktionen der einzelnen Bezüge A und B. Von daher ist diese Methode zum Aufbau des gemeinsamen Bezugs funktionsfähig. In diesem Fall gibt es keinen Unterschied, ob A-B oder B-A gekennzeichnet wird.

Bild 59c zeigt zwei schräg zueinander stehende Bezugsgeraden A und B. Die neu entwickelte Methode und Systematik erklären ebenfalls das Beispiel in Bild 59b.

Die Defizite wurden durch die neu entwickelte Systematik beseitigt. Die Verbesserungen sind wie folgt zusammengefasst:

Verbesserung 1: Die neue Systematik betrachtet alle Situationen der relativen Orientierung zwischen zwei Geraden und ist vollständig.

Verbesserung 2: Eine funktionsfähige Methode für den Aufbau eines gemeinsamen Bezugs wurde entwickelt. Der gemeinsame Bezug darf von einer oder mehreren Kombinationen von Situationselementen aufgebaut werden.

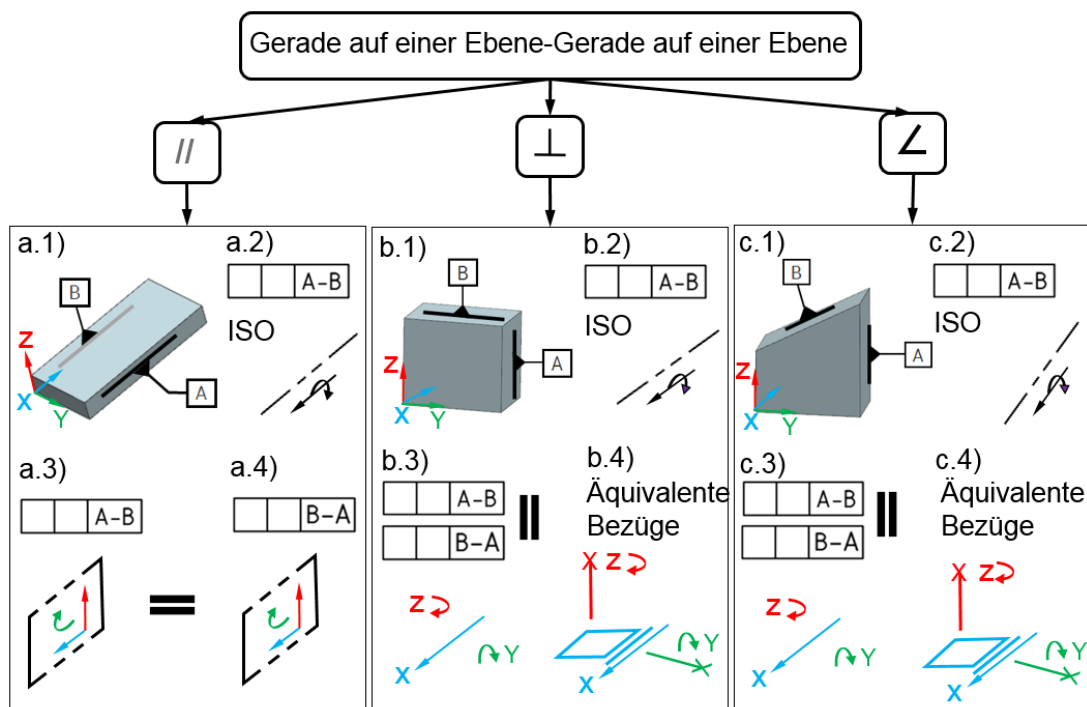


Bild 59 Gesamte Systematik zum Aufbau einer Geraden auf einer Ebene als gemeinsamer Bezug

5.2.2 Achse - Achse als gemeinsamer Bezug

Die Definition, die Defizite und der Definitionswiderspruch des gemeinsamen Bezugs Achse-Achse wurden bereits in Kapitel 2.1.2.2 in Bild 9 beschrieben. Bild 60 zeigt die dazu entwickelte Systematik. Je nach der relativen Orientierung der zwei Achsen kann in Parallelität (Bild 60a), Rechtwinkligkeit und Winkligkeit unterteilt werden.

Bild 60b.1 zeigt zwei senkrecht zueinander stehende Achsen. Nach dem Kollektionsprozess von ISO 5459 ergibt sich die Mittellinie von A und B als gemeinsamer Bezug, welche mit einem 45° -Winkel im Raum steht (Bild 60b.2). Diese entspricht nicht der Funktion eines gemeinsamen Bezugs. Die zwei einzelnen Achsen können alle Freiheitsgrade des Bauteils blockieren. Deswegen ist der gemeinsame Bezug eine Kombination aus einer Ebene, einer Geraden und einem Punkt. Der gemeinsame Bezug A-B besteht aus den folgenden Situationselementen: Die Ebene wird durch Achse A und B gebildet; Die Gerade ist parallel zu A, weil der Buchstabe A vor B steht, sodass A die Priorität hat; der Punkt ist der Kreuzpunkt von A und B. Bild 60b.3 illustriert diese Kombination. Analog zu Bild 60b.3 wird der gemeinsame Bezug B-A ähnlich aufgebaut, nur ist die Gerade nun parallel zu B.

Bild 60c zeigt zwei schräg zueinander stehende Bezugsachsen A und B. Die neu entwickelte Systematik erklärt ebenfalls das Beispiel in Bild 59b.

Die Defizite wurden durch die neu entwickelte Systematik beseitigt. Die Verbesserungen sind wie folgt zusammengefasst:

Verbesserung 1: Die neu entwickelte Systematik ist vollständig und betrachtet alle Situationen der relativen Orientierung zwischen zwei Bezugsachsen.

Verbesserung 2: Der Grund, warum es Bedeutungsunterschiede bei der Reihenfolge der einzelnen Bezüge in einem gemeinsamen Bezug gibt, wurde erläutert.

Verbesserung 3: Eine funktionsbasierte Methode für den Aufbau des gemeinsamen Bezugs wurde entwickelt.

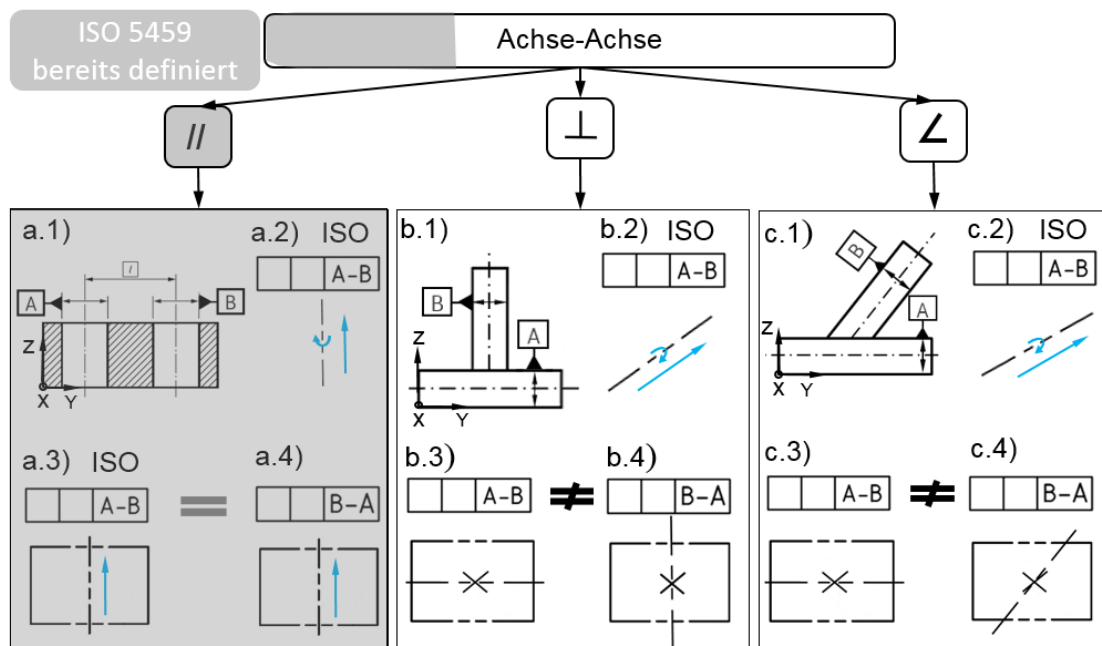


Bild 60: Gesamte Systematik zum Aufbau der Achse-Achse als gemeinsamer Bezug

5.2.3 Gerade auf einer Ebene - Achse als gemeinsamer Bezug

In ISO 5459 gibt es keine Definition für die gemischte Kombination des gemeinsamen Bezugs: Gerade auf einer Ebene-Achse. Das Defizit wurde in Kapitel 2.1.2.2 beschrieben. Eine neue dazu entwickelte Systematik wird in Bild 61 vorgestellt. Je nach der relativen Orientierung zwischen einer Geraden auf einer Ebene und einer Achse kann in Parallelität, Rechtwinkligkeit und Winkligkeit unterteilt werden.

Bild 61a.1 zeigt zwei parallele, einzelne Bezüge A und B. A ist die Achse des Zylinders und B ist eine Gerade auf der XZ-Ebene. Bild 61a.2 zeigt die nach dem ISO Halbierungsprozess entstehende Mittellinie als gemeinsamen Bezug. Diese lässt noch zwei Freiheitsgrade frei, welche nicht der Funktion zweier einzelner Bezüge entsprechen. Bild 61a.3 stellt den funktionsbasierten, gemeinsamen Bezug A-B dar, welcher aus einer Ebene und einer Geraden besteht. Die Ebene wird von der Geraden B und der Achse A gebildet. Die Gerade besitzt die Position von A, da A in der A-B Schreibweise Priorität hat. Bild 61a.4 zeigt den gemeinsamen Bezug B-A, welcher ebenfalls aus einer Ebene und einer Geraden besteht. Jedoch besitzt die Gerade die Position von B, da in diesem Fall B die Priorität hat.

Bild 61b.1 zeigt zwei senkrecht zueinander stehende einzelne Bezüge A und B. Der nach ISO erzeugte, gemeinsame Bezug ist nicht funktionsfähig (Bild 61b.2). Bild 61b.3 zeigt den gemeinsamen Bezug A-B, welcher aus einer Geraden und einem Punkt besteht. Identisch wie die jeweils in A und B zusammen eingeschränkten Freiheitsgrade, schränkt diese Kombination ebenfalls 5 Freiheitsgrade ein. Achse A beschreibt die Gerade und der Punkt den Schnittpunkt von A und B. Wenn der gemeinsame Bezug als B-A im Bezugsrahmen gekennzeichnet wird (Bild 61b.4), ändert sich die jeweilige Position der Geraden und des Punkts nicht. In diesem Fall ist die Reihenfolge des einzelnen Bezugs irrelevant.

Bild 61c.1 zeigt zwei schräg zueinander stehende einzelne Bezüge A und B. Die nach dem ISO Halbierungsprozess entstehende Mittellinie von A und B entspricht nicht ihrer Funktion (Bild 61c.2). Das Bauteil kann durch die beiden Bezüge A und B im Raum fixiert werden. Deswegen ist der gemeinsame Bezug eine Kombination einer Ebene, einer Geraden und einem Punkt. Bild 61c.3 zeigt diese Kombination des gemeinsamen Bezugs A-B. Die Ebene wird durch A und B gebildet. Die Gerade ist die Achse A. Der gezeigte Punkt ist der Schnittpunkt von Achse A und Gerade B. Bild 61c.4 zeigt den anderen gemeinsamen Bezug B-A. Der Unterschied im Vergleich zum A-B Bezug ist, dass die Position der Geraden in dem gemeinsamen Bezug nach B orientiert ist. Die Funktion an sich bleibt gleich. Diese neu entwickelte, vollständige Systematik füllt die Definitionslücke von ISO 5459 und bietet dazu eine neue Methode, um einen funktionsbasierten, gemeinsamen Bezug aufzubauen.

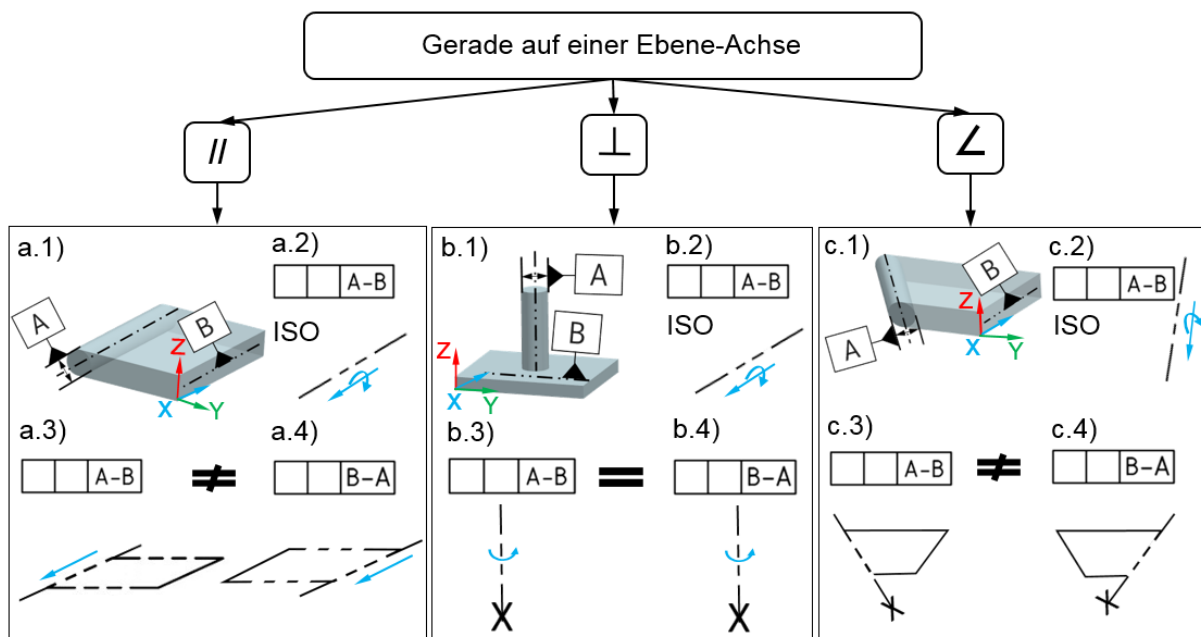


Bild 61 Gesamte Systematik zum Aufbau einer Geraden auf einer Ebene-Achse als gemeinsamer Bezug

5.3 Punkt - Punkt als gemeinsamer Bezug

Auf Basis von Kapitel 4.3 gibt es zwei Bezugspunkte: Punkt auf einer Fläche und Mittelpunkt. Bild 62 stellt die Unterteilung der Systematik zu „Punkt-Punkt“ als gemeinsamen Bezug dar. Es gibt insgesamt drei Kombinationen aus diesen zwei Arten von Bezugspunkten. Aus mathematischer Sicht gibt es keine Parallelität, Rechtwinkligkeit oder Winkligkeit zwischen zwei Punkten. Die Richtung zwischen zwei Punkten wird als „Relative Orientierung“ bezeichnet. Diese wird in folgenden Kapiteln beschrieben.

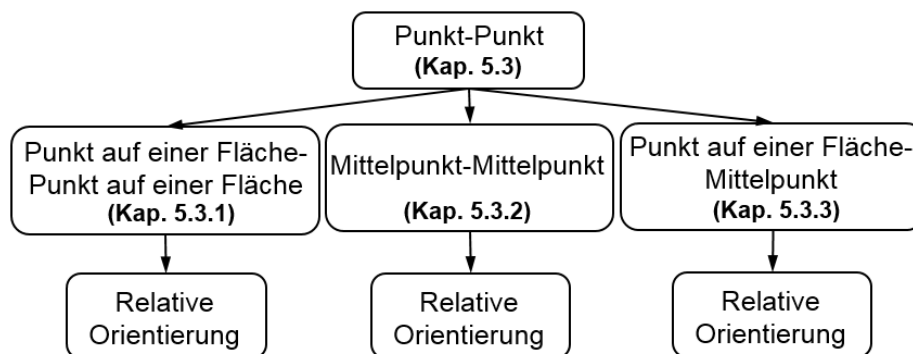


Bild 62 Gesamte Systematik zum Aufbau von Punkt-Punkt als gemeinsamer Bezug

5.3.1 Punkt auf einer Fläche - Punkt auf einer Fläche als gemeinsamer Bezug

In ISO 5459 gibt es keine Definition für einen Punkt auf einer Ebene als Bezug, daher auch keine Definition für einen gemeinsamen Bezug. Bild 63 zeigt die dazu neu entwickelte Systematik. Bild 63.1 zeigt ein Bauteil, welches mit zwei beweglichen Bezugsstellen A1 und B1 ausgerichtet wird. Die einzelnen Bezüge A und B sind jeweils Punkte auf der Seitenfläche. Der nach dem ISO Halbierungsprozess gebildete, mittlere Punkt von A und B entspricht nicht seiner Funktion (Bild 63.2), welche durch die einzelnen Bezüge A und B zusammen an dem Bauteil wirkt. Bild 63.3 stellt den funktionsbasierten gemeinsamen Bezug A-B dar, welcher eine Mittelebene ist. Diese Ebene kann drei Freiheitsgrade des Bauteils einschränken. Dies entspricht ihrer Funktion. Die Ebene enthält den mittleren Punkt von A und B und ist parallel zur XZ-Ebene. Bild 63.4 zeigt eine andere Schreibweise des gemeinsamen Bezugs B-A. Die erzeugte Mittelebene hat sich dadurch nicht geändert. In diesem Fall ist die Bedeutung der Kennzeichnung A-B und B-A identisch.

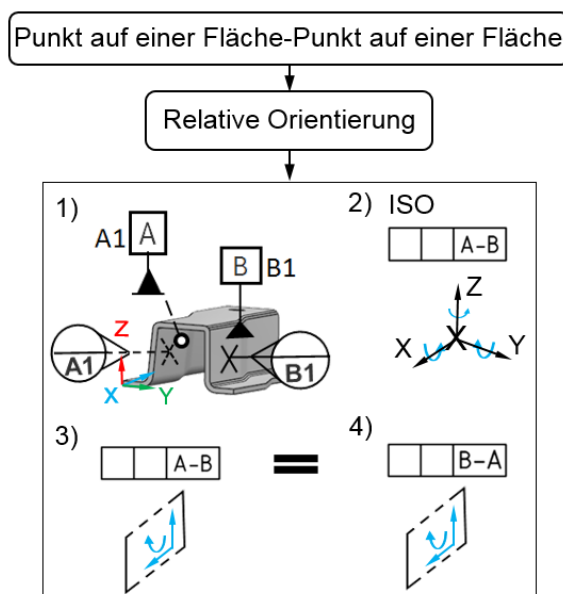


Bild 63 Neue Systematik zum Aufbau: Punkt auf einer Fläche-Punkt auf einer Fläche als gemeinsamer Bezug

5.3.2 Mittelpunkt - Mittelpunkt als gemeinsamer Bezug

Bild 64 zeigt die neue Systematik zum Aufbau des gemeinsamen Bezugs Mittelpunkt-Mittelpunkt. Bild 64.1 zeigt ein Bauteil mit zwei Kugeln. Die Bezüge A und B sind jeweils der Mittelpunkt der Kugel. Der nach ISO entstehende, mittlere Punkt von A und B entspricht nicht der Realität (Bild 64.2), nämlich wie die einzelnen Bezüge A und B zusammen an dem Bauteil

wirken. Bild 64.3 stellt den gemeinsamen Bezug A-B als eine Kombination einer Geraden und eines Punkts dar. Die Gerade wird durch die Mittelpunkte A und B gebildet. Die Position des Punktes ist gleich wie A, da A die Priorität in der Schreibweise A-B besitzt. Dieser gemeinsame Bezug ist funktionsfähig. Bild 64.4 stellt die andere Schreibweise des gemeinsamen Bezugs als B-A dar. Die Kombination ändert sich nicht, jedoch ist die Position des Punkts nach B orientiert. Es gibt Unterschiede vom Denkmodell zwischen A-B und B-A auf einer theoretischen Ebene. In der Praxis gibt es keinen Unterschied.

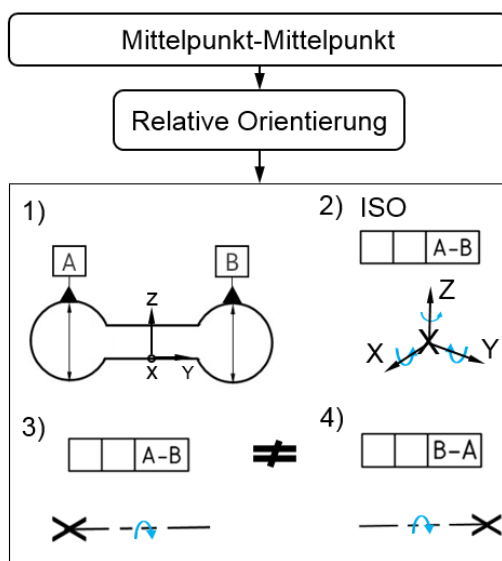


Bild 64 Neue Systematik zum Aufbau: Mittelpunkt-Mittelpunkt als gemeinsamer Bezug

5.3.3 Punkt auf einer Fläche - Mittelpunkt als gemeinsamer Bezug

In ISO 5459 gibt es keine Definition für die gemischte Kombination des gemeinsamen Bezugs Punkt auf einer Ebene - Mittelpunkt. Das Defizit wurde in Kapitel 2.1.2.2 beschrieben. Eine neue dazu entwickelte Systematik wird in Bild 65 vorgestellt.

Bild 65.1 zeigt ein Bauteil mit einer Kugel. Das Bauteil wird von einer beweglichen Bezugsstelle A1 und dem Mittelpunkt B ausgerichtet. Der Bezug A ist ein Punkt auf der Seitenebene. Bezug B ist der Mittelpunkt. Der nach dem ISO 5459 Halbierungsprozess erzeugte mittlere Punkt von A und B entspricht nicht seiner Funktion (Bild 65.2). Bild 65.3 stellt den gemeinsamen Bezug als eine Kombination einer Geraden und eines Punkts dar. Die Gerade wird von A und B gebildet. Der Punkt ist A. Zusammen wird durch die Kombination nur eine Rotation um die Y-Achse freigelassen, was der Funktion des gemeinsamen Bezugs

entspricht. Bild 65.4 zeigt die andere Kennzeichnungsweise des gemeinsamen Bezugs B-A. Jedoch ist die Position des Punkts nach dem Mittelpunkt B orientiert.

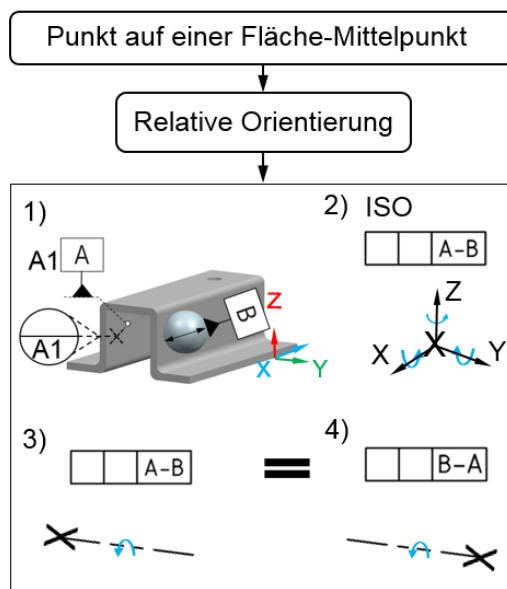


Bild 65 Neue Systematik zum Aufbau von Punkt auf einer Fläche - Mittelpunkt als gemeinsamer Bezug

5.4 Kombinationsmöglichkeiten des gemeinsamen Bezugs

Bis jetzt wird in Kapitel 5 nur der gemeinsame Bezug mit dem gleichen Situationselement betrachtet. Ein gemeinsamer Bezug mit gemischten Situationselementen, z.B.: Ebene-Gerade, Gerade-Punkt oder Punkt-Ebene wird in ISO 5459 nicht berücksichtigt. Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene Systematik und Methode sind ebenfalls für den gemischten gemeinsamen Bezug verwendbar. Aus diesem Grund wird diese Methode nicht mehr in diesem Kapitel wiederholt. Stattdessen wird eine Kombinationstabelle für den gemischten, gemeinsamen Bezug erstellt. Als Beispiel werden zwei Situationselemente in einem gemeinsamen Bezug betrachtet. Für mehr als zwei Situationselemente wird die Vorgehensweise analog dazu verfolgt. Je nachdem, ob die Reihenfolge der einzelnen Bezüge im gemeinsamen Bezug von Bedeutung ist, kann die Beschreibung der Kombinationstabelle in zwei Unterkapitel unterteilt werden: ohne Bedeutung der Reihenfolge der einzelnen Bezüge (Kap.5.4.1) und mit Bedeutung der Reihenfolge der einzelnen Bezüge (Kap.5.4.2).

5.4.1 Kombinationstabelle ohne Bedeutung der Reihenfolge der einzelnen Bezüge

Auf Basis von ISO 5459 ist die Reihenfolge des einzelnen Bezugs im gemeinsamen Bezug irrelevant. Jedoch wurde in den vorherigen Kapiteln nachgewiesen, dass nicht bei allen einzelnen Bezügen die Reihenfolge irrelevant ist. In diesem Kapitel wird die maximale Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten von zwei einzelnen Bezügen für den Aufbau eines gemeinsamen Bezugs dargestellt. Ob die Reihenfolge der Bezüge von Bedeutung ist, muss bei jedem gemeinsamen Bezug und bei jedem konkreten Bauteil beurteilt werden. Je nach Art des Situationselements des einzelnen Bezugs, kann zwischen zwei Fällen in der Kombinationstabelle (Tabelle 6) unterschieden werden.

1. Die zwei einzelnen Bezüge besitzen das gleiche GE, z.B. Ebene-Ebene. Dieser Fall wird in der Tabelle 6 als A1-A2 bezeichnet. Der Buchstabe A bedeutet, dass es sich um das gleiche GE handelt.

2. Die zwei einzelnen Bezüge besitzen unterschiedliche GE, z.B. Ebene-Punkt. Dieser Fall wird als A-B bezeichnet. Die unterschiedlichen Buchstaben symbolisieren die jeweilige Art eines GE.

In der Tabelle 6 wird die Zeile mit den fünf konkreten Arten des einzelnen Bezugs aufgelistet. Die Spalte wird ebenfalls mit den fünf GE aufgelistet. Der weiße Bereich zeigt die Kombinationsmöglichkeiten des gemeinsamen Bezugs mit denselben GE. Die Summe beträgt 5. Der Graubereich zeigt die Kombinationsmöglichkeiten des gemeinsamen Bezugs mit unterschiedlichen GE. Die Summe beträgt 10. Wenn die Anzahl der einzelnen Bezüge größer als zwei ist, ist dieser Matrixgedanke ebenfalls verwendbar. Dies ist jedoch komplizierter.

□ A1—A2 = 5 ■ A—B = 10

Einzelner Bezug	Ebene (E)	Gerade auf einer Ebene (G)	Achse (A)	Punkt auf einer Fläche (P)	Mittelpunkt (M)
Ebene (E)	E — E	E — G	E — A	E — P	E — M
Gerade auf einer Ebene (G)		G — G	G — A	G — P	G — M
Achse (A)			A — A	A — P	A — M
Punkt auf einer Fläche (P)				P — P	P — M
Mittelpunkt (M)					M — M

Tabelle 6 Kombinationstabelle ohne Bedeutung der Reihenfolge der einzelnen Bezüge in einem gemeinsamen Bezug

5.4.2 Kombinationstabelle mit Bedeutung der Reihenfolge der einzelnen Bezüge

Dieses Kapitel beschreibt die Kombinationsmöglichkeiten des einzelnen Bezugs in einem gemeinsamen Bezug, wobei die Reihenfolge der einzelnen Bezüge von Bedeutung ist. Tabelle 7 stellt die Matrix dar. Tabelle 7 wird auf Basis von Tabelle 6 weiterentwickelt. Die gesamte Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten für A1-A2 ist doppelt so hoch wie in Tabelle 6, da nun die Bedeutung der Reihenfolge eine Rolle spielt. Daraus ergibt sich die gesamte Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten für A1-A2 von 10. Aus demselben Grund sind die Kombinationsmöglichkeiten für A-B ebenfalls doppelt so hoch wie in Tabelle 6. Die Anzahl beträgt insgesamt 20.

Diese Matrix beschreibt alle Kombinationsmöglichkeiten der zwei einzelnen Bezüge in einem gemeinsamen Bezug. Diese Methode kann wiederum für mehr als zwei einzelne Bezüge in einem gemeinsamen Bezug verwendet werden. Sie füllt die Definitionslücke von ISO 5459 und bietet eine logisch aufeinander aufgebaute Struktur der Kombinationsmöglichkeiten des einzelnen Bezugs an.

$$\square A1-A2 = 5 \times 2 = 10 \quad \blacksquare A-B = 10 \times 2 = 20$$






Einzelner Bezug	Ebene (E)	Gerade auf einer Ebene (G)	Achse (A)	Punkt auf einer Fläche (P)	Mittelpunkt (M)
Ebene (E)	E — E 	E — G	E — A	E — P	E — M
Gerade auf einer Ebene (G)	G — E	G — G 	G — A	G — P	G — M
Achse (A)	A — E	A — G	A — A 	A — P	A — M
Punkt auf einer Fläche (P)	P — E	P — G	P — A	P — P 	P — M
Mittelpunkt (M)	M — E	M — G	M — A	M — P	M — M 

Tabelle 7 Kombinationstabelle mit Bedeutung der Reihenfolge der einzelnen Bezüge in einem gemeinsamen Bezug

6 Aufbau eines Bezugssystems

Nach der Beschreibung des einzelnen und gemeinsamen Bezugs wird nun der Aufbau des Bezugssystems in diesem Kapitel beschrieben. Die Theorie für den Aufbau des Bezugssystems von ISO 5459 wurde in Kapitel 2.1.2.3 beschrieben. Um ein Bezugssystem aufzubauen, muss zuerst die primäre Bezugsebene gebildet werden, da die sekundären und tertiären Bezüge gemäß der primären Bezugsebene aufgebaut werden. Das Defizit für den Aufbau der Bezugsebene von ISO 5459 wurde in Kapitel 4.1.1 in Bild 33 beschrieben. Die Theorie und das entsprechende Defizit für den Aufbau des Bezugssystems von ASME Y14.5 und der RPS-Methode wurden in Kapitel 2.1.5 und 2.2 beschrieben. Die dazu neu entwickelte Methode wird in diesem Kapitel vorgestellt.

Um die primäre Bezugsebene aufzubauen, wurde die entwickelte Flächennormalvektor (FNV)-Methode in Kapitel 4.1.1 beschrieben. Diese Methode wurde als funktionsbasierte Methode nachgewiesen. Daher kann die FNV-Methode weiterhin für den Aufbau des Bezugssystems verwendet werden. Die FNV-Methode verfolgt das Bezugsrahmen-Denkmodell von ASME Y14.5, da es in der Praxis einfach nachvollziehbar und verwendbar ist und anschaulich dargestellt werden kann. Bild 66 und Bild 67 stellen zwei konkrete Beispiele, jeweils mit einer Regelgeometrie und einer Freiformgeometrie dar, um die FNV-Methode besser zu erläutern.

Bild 66a ist ein Bauteil mit zwei schrägen Zylindern auf einer horizontalen Ebene. Der Pfeil auf der Ebene C symbolisiert ihre FNV. Die Orientierungen des sekundären und tertiären Bezugs können gemäß der FNV Richtung gebildet werden. Die zwei Achsen A und B werden auf Basis der ISO Theorie automatisch senkrecht zu C orientiert (Bild 66b). Die sekundäre Bezugsebene A' wird durch die zwei automatisch gedrehten Achsen gebildet. Die tertiäre Bezugsebene B' enthält die automatisch gedrehte Achse B und ist senkrecht zu C und A'. Dadurch wird ein vollständiges Bezugssystem aufgebaut.

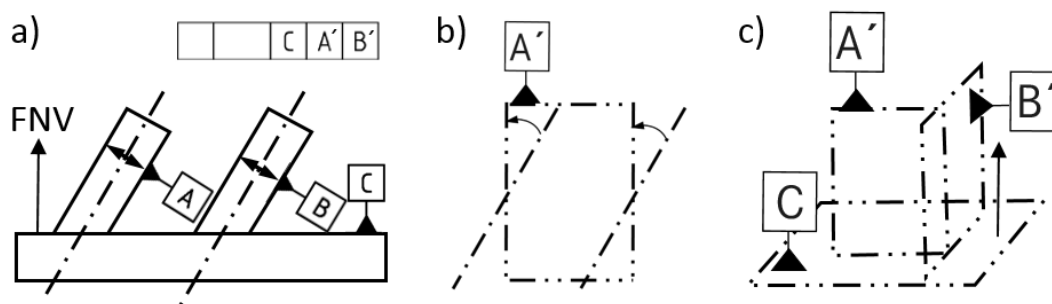


Bild 66 FNV-Methode. a) Bauteil, b) Aufbau der Bezugsebene A', c) Bezugssystem

Bild 67 zeigt die Vorgehensweise des Aufbaus eines funktionsbasierten Bezugssystems für eine Freiformgeometrie nach der FNV-Methode. Bild 67a zeigt das Bauteil (ähnlich wie in Bild 35). Der jeweilige FNV der primären Bezugsstellen A1-A3 wird in Bild 67b dargestellt. In diesem Fall besitzen alle FNV die gleiche Richtung. A2 wird entlang ihres FNV mit theoretischem exaktem Maß (TED) auf die Ebene von A1 und A3 projiziert. Die primäre Bezugsebene A' wird durch A1, A3 und $A2'$ gebildet. Die Bewegungsrichtung von A' entspricht ihrer Funktion und der Realität. Auf Basis von A' kann das vollständige Bezugssystem aufgebaut werden. Wenn alle Bezugsstellen ausgerichtet sind, ist das Bauteil im Raum fixiert. Bild 67c zeigt das Bauteil in einer anderen Position im Raum. Die Richtung des FNV der jeweiligen primären Bezugsstellen A1-A3 wird mit der Position des Bauteiles automatisch mitgeändert. Die erzeugte Bewegungsrichtung des neu gebildeten A' entspricht der realen Bewegungsrichtung des Bauteils. Die Funktionsfähigkeit der Methode ist nachgewiesen. Bild 67d stellt das entsprechende, vollständige Bezugssystem dar. Wenn die FNV bei den jeweiligen primären Bezugsstellen unterschiedliche Richtungen besitzen, kann die Methode aus Bild 36 angewendet werden [228].

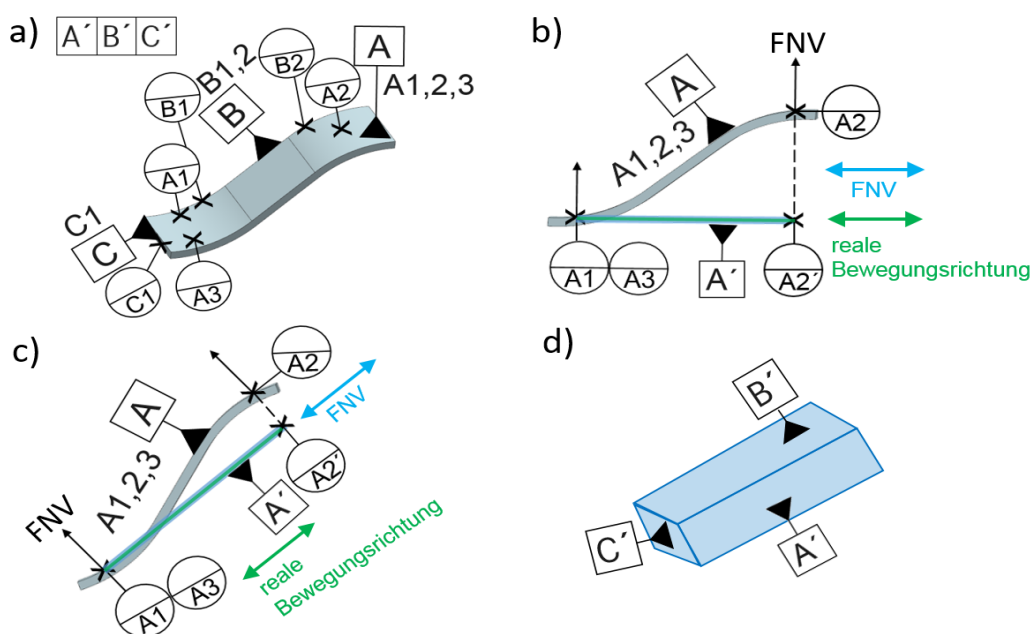


Bild 67 FNV-Methode. a) Bauteil, b) Seitenansicht, c) Bauteil mit anderer Position, d) Illustration des Bezugssystems

Die neu entwickelte FNV-Methode kann für alle Bauteile mit verschiedenen Positionen verwendet werden und ist funktionsbasiert. Wenn das Bauteil mit allen Bezugsstellen ausgerichtet ist, werden alle 6 Freiheitsgrade eingeschränkt. Das Bauteil ist nun im Raum

fixiert. Das Messergebnis des tolerierten GE wird aufgrund der kompletten Fixierung des Bauteils identisch sein, wie beim Aufbau des Bezugssystems nach anderen Theorien (z.B. ISO, ASME und RPS). Diese Hypothese wird im folgenden Bild 68 validiert und die weiteren praxisbezogenen Beispiele werden in Kapitel 9 dargestellt.

Bild 68 zeigt ein Bauteil und die Messergebnisse einer Position des Lochs bei Verwendung der vier verschiedenen Bezugssysteme. Das Bauteil wird durch ein vollständiges Bezugssystem mit primärem Bezug A, sekundärem Bezug B und tertiärem Bezug C ausgerichtet. Das Bauteil ist vollständig im Raum fixiert. Wenn alle Freiheitsgrade eingeschränkt sind, spielt auf Basis der neu entwickelten Theorie die Methode zum Aufbau des Bezugssystems keine Rolle mehr. Deswegen sind die Messergebnisse der Position des Lochs des Bauteils bei den vier Bezugssystemen identisch. In diesem Fall besitzen die primären Bezugsstellen alle die gleiche Richtung, deswegen sind die gebildeten einzelnen Bezüge von RPS/ASME/FNV identisch. Die gebildeten einzelnen Bezüge von ISO sind schräg im Raum. Jedoch beeinflusst dies die Messergebnisse des Lochs nicht, wenn das Bauteil im Raum fixiert ist.

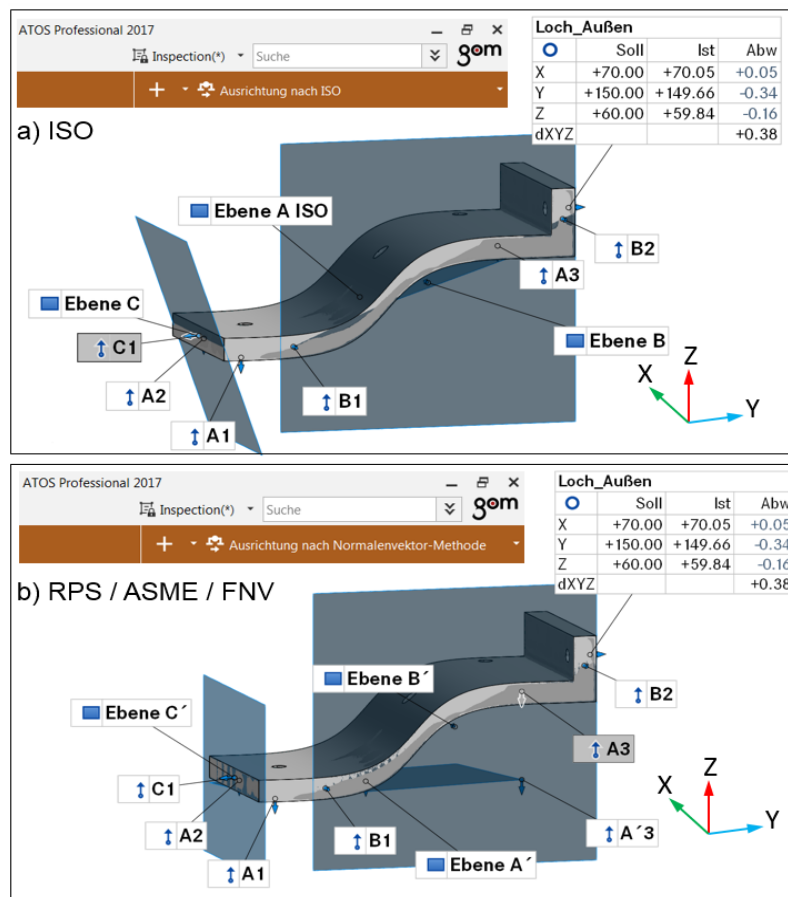


Bild 68 Messergebnisse der Position des Lochs nach vier Bezugssysteme. a) Messergebnis nach ISO und b) Messergebnis nach RPS/ ASME/ FNV-Methode

7 Systematik für die Profiltoleranz

Nach der Analyse von Bezügen und Bezugssystemen wird nun die Tolerierung in Kapitel 7 und 8 beschrieben. Dieses Kapitel behandelt die Profiltoleranz (Linienprofil- und Flächenprofiltoleranz) aus ISO 1101 und ISO 1660. Die Definition von ISO und die entsprechenden Defizite wurden bereits in Kapitel 2.1.3 beschrieben. Je nach Anzahl der Toleranzindikatoren für ein GE kann man in Kapitel 7.1 Ergänzung und Erweiterung der Definition der Linienprofiltoleranz, und in Kapitel 7.2 Definition der Verbundtoleranz für Linienprofiltoleranz, unterteilen. Kapitel 7.3 beschreibt die Verbundtoleranz für Flächenprofiltoleranz.

7.1 Ergänzung und Erweiterung der Definition der Linienprofiltoleranz auf Basis der ISO Standards

Bild 69 zeigt die gesamte Systematik der Linienprofiltoleranz. Je nach Herkunft des TGE kann zwischen realem GE und abgeleitetem GE unterschieden werden. Bei einem realen GE kann nach der Form des TGE zwischen einer Linie und einer sehr dünnen Fläche unterschieden werden. Diese sehr dünne Fläche wird in der Praxis als Linie betrachtet, wenn die Wanddicke der Fläche kleiner ist, als das Dreifache des Durchmessers des Kugeltasters in Taktillmessmaschinen [242, 243, 244, 245]. Für diesen Fall gibt es in ISO keine Definition. Bei der Tolerierung des abgeleiteten GE kann nach verschiedenen Toleranzarten (Orts-, Richtungs- und Formtoleranz) weiter unterschieden werden. Die Details werden in den angegebenen Kapiteln beschrieben.

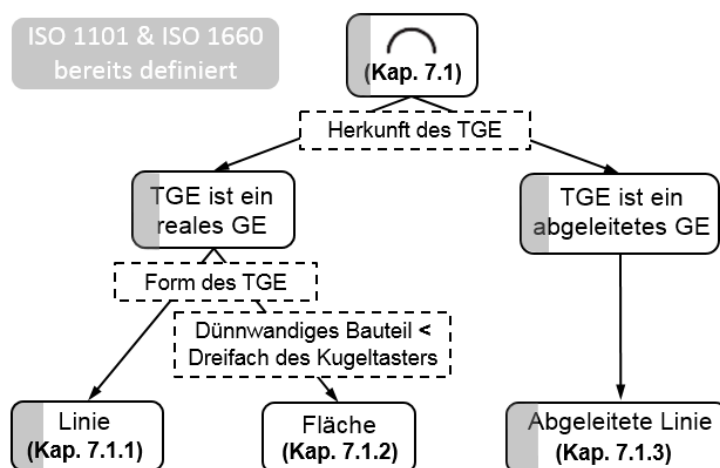


Bild 69 Gesamte Systematik zur Linienprofiltoleranz

7.1.1 Reale Kurve als toleriertes Geometrieelement

Bild 70 zeigt eine neu entwickelte Systematik für die Tolerierung einer realen Kurve unter Anwendung der Linienprofiltoleranz. Bei einer Kurve kann zwischen offener und geschlossener Kurve unterschieden werden. Je nach Herkunft des TGE kann weiterhin zwischen einer gesamten Linie und einer Linie als Teil einer Fläche unterschieden werden. ISO hat bereits die Anwendung der Linienprofiltoleranz für eine Linie als Teil einer Fläche definiert (Bild 70b). Wenn das TGE eine gesamte konkrete Linie ist, wird dies in ISO nicht definiert. Bild 70a zeigt eine konkrete Linie als TGE. Jedoch ist die Definition der Richtung der Kreisscheibe der Toleranzzone entlang der Linie nach ISO unklar. Ein Lösungsvorschlag ist, dass die Richtung der Kreisscheibe immer nach den Funktionen des TGE orientiert wird. In diesem Fall ist die Kreisscheibe der Toleranzzone parallel zur Bezugsebene C. Wenn die Seitenwand mit Flächenprofiltoleranz toleriert wird (Bild 70c), dann existiert automatisch eine physikalische Konfliktzone zwischen der Toleranzzone, der Linienprofiltoleranz und der Flächenprofiltoleranz (Bild 70d). Bild 70d zeigt die Draufsicht des Bauteils. Die Kreisscheibe der Linienprofiltoleranz besitzt einen Durchmesser von 0,5 mm und der Kugeldurchmesser der Flächenprofiltoleranz beträgt 1,0 mm. Nun ist es unklar, welche Toleranzzone die Linie einschränken soll. Da die Linie ein physischer Bestandteil der Seitenwand ist, kann die Linie theoretisch nicht unabhängig von der Seitenwand toleriert werden. Der Lösungsvorschlag ist, dass die Linie und die Seitenwand nach ihrer Priorität toleriert werden.

Nun wird der andere Fall, wenn das TGE eine geschlossene Kurve ist, betrachtet. Wenn das TGE ein Teil einer Fläche ist, wird dies in ISO klar definiert (Bild 70f). Wenn das TGE eine gesamte Linie ist (Bild 70e), wird dies analog zu Bild 70a in ISO nicht definiert. Der Lösungsvorschlag ist hier gleich wie in Bild 70a. Bild 70g zeigt die Darstellung der Tolerierung in einem 3D CAD Programm bei mehreren TGE. In diesem Fall werden weder der Modifikator UF (united feature), noch die vier Hinweislinien benötigt. Bei Anklicken des Toleranzindikators werden die entsprechenden vier TGE hervorgehoben. Dies ist eine Vereinfachung im CAD Programm.

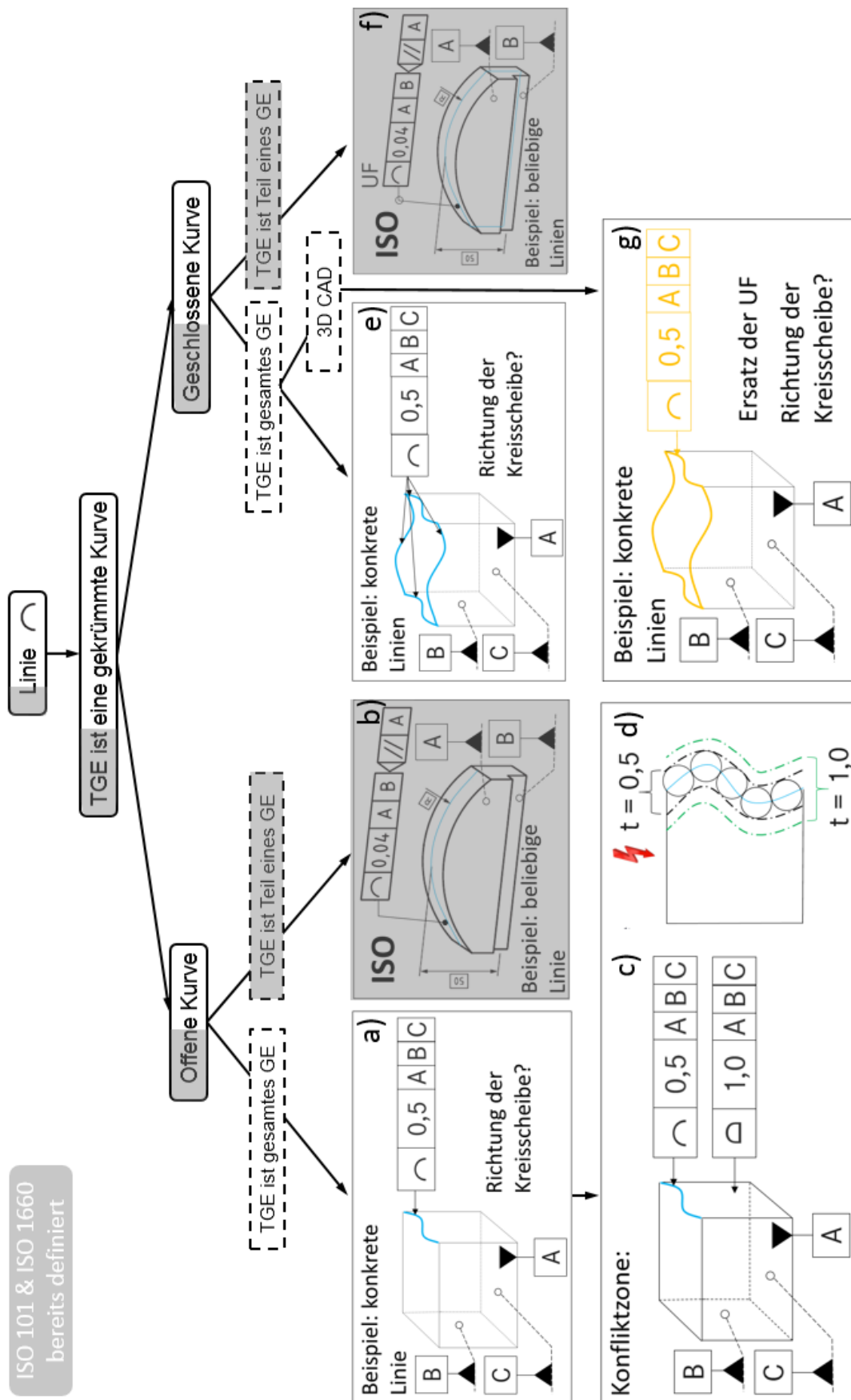


Bild 70 Gesamte Systematik für die Tolerierung einer realen Kurve mit Linienprofiltoleranz

7.1.2 Sehr dünne reale Fläche als toleriertes Geometrieelement

Um eine Fläche in der Praxis zu definieren, muss mindestens das Dreifache des Durchmessers eines Kugeltasters an die Fläche angepasst werden. Liegt dieser Wert darunter, dann wird diese Fläche als eine Linie vermessen [245]. Eine sehr dünne Fläche wird aus diesem Grund als Linie betrachtet und toleriert. Jedoch gibt es in den ISO Normen keine Definition für die Tolerierung einer solchen „Linie“. Deshalb sollte die Definition für die Linienprofiltoleranz erweitert und ergänzt werden, damit dieses Symbol ebenfalls für ein dünnwandiges Bauteil verwendbar wird.

Bild 71 zeigt die dazu neu entwickelte Systematik für die Tolerierung einer sehr dünnen Fläche. Je nach Form der Linie kann zwischen gerader Linie und gekrümmter Linie unterschieden werden. Nach der Praxisanwendung kann die Linie in Kante, Ausschnitt und Falz unterteilt werden [246, 247, 248, 249]. Bild 71a zeigt eine Kante, die von D bis E durch eine Linienprofiltoleranz toleriert wird. Die Kreisscheibe der Toleranzzone ist entlang der Kante und parallel zur Bezugsebene A definiert. Die Orientierung der Toleranzzone entspricht den Funktionen der Kante, welche aufgrund der Werkzeugmaschine nur nach innen und außen variiert werden kann. Bild 71b zeigt die 3D Tolerierung dieser Kante, wobei der Modifikator UF (united feature) sowie die Buchstaben D und E weggelassen werden können. Bild 71c zeigt einen Ausschnitt von einem dünnwandigen Bauteil als TGE. Die Kreisscheibe der Toleranzzone bewegt sich entlang der vier einzelnen Linien und ist parallel zur Bezugsebene A. Diese Definition entspricht der Funktion des Ausschnitts. Bild 71d zeigt die entsprechende 3D CAD Tolerierung. Bild 71e zeigt einen Falz als TGE. Die Kreisscheibe der Toleranzzone liegt entlang des Falzes und parallel zur Bezugsebene A. Der Falz darf nach innen und außen variiert werden, was auch der Realität entspricht. Bild 71f zeigt die entsprechende 3D Tolerierung.

Wenn das TGE eine gekrümmte Linie ist, kann diese wieder in Kante, Ausschnitt und Falz unterteilt werden. Der einzige Unterschied zwischen Bild 71a-f und Bild 71g-l ist, dass das TGE nicht mehr eine gerade Linie ist, sondern eine gekrümmte Linie. Die Logik sowie das Denkmodell sind identisch. Die erweiterte Definition für eine gerade Linie kann ebenfalls für eine gekrümmte Linie verwendet werden. In Bild 71k soll explizit erläutert werden, dass die tolerierte Kurve der äußerste Umriss des Falzes ist. Dieser Umriss wird weder im Datensatz, noch in der Zeichnung konstruktiv ausgeführt. Es ist die höchste Kante des Falzes. Die Kreisscheibe der Toleranzzone ist entlang des Umrisses und parallel zur Bezugsebene A definiert.

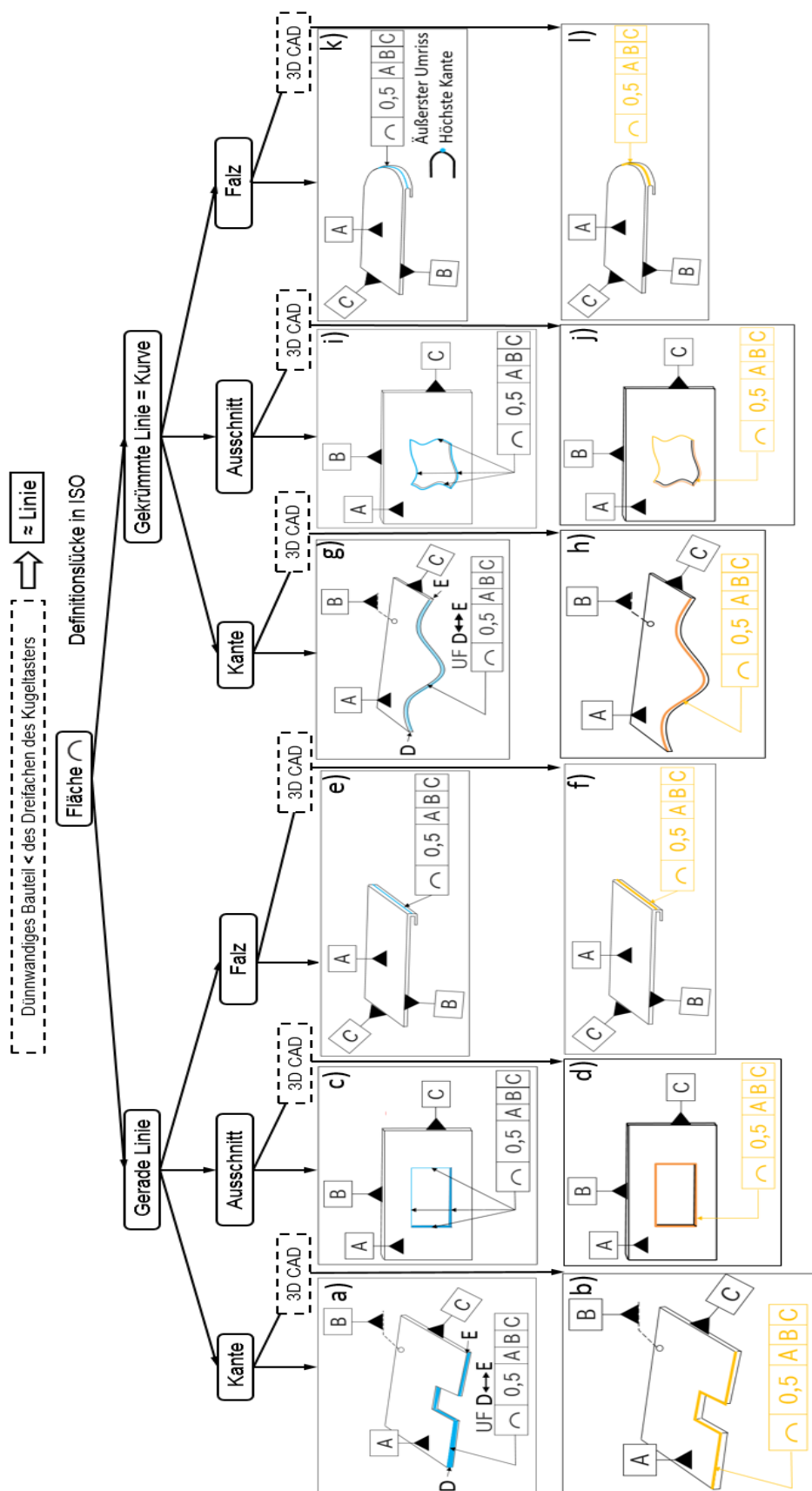


Bild 71 Gesamte Systematik für die Tolerierung einer realen, sehr dünnen Fläche mit Linienprofilltoleranz

7.1.3 Abgeleitete gekrümmte Mittellinie als toleriertes Geometrieelement

Dieses Kapitel beschreibt eine abgeleitete gekrümmte Mittellinie als ein TGE. Bild 72 zeigt die dazu neu entwickelte Systematik. Das Kreuzzeichnen beschreibt die in ISO nicht definierten und theoretisch nicht funktionierenden Fälle. Je nach Toleranzart der Linie kann zwischen Form-, Orts- und Richtungstoleranz unterschieden werden. In der jeweiligen Toleranzart kann zwischen „mit \emptyset “ und „ohne \emptyset “ unterschieden werden.

Bild 72a wird in ISO definiert (siehe Bild 13). Bild 72b zeigt die entsprechende, funktionsbasierte 3D CAD Darstellung. In ISO ist die Tolerierung einer Mittellinie nur mit \emptyset vorgesehen. Ohne \emptyset ist dies in ISO nicht definiert. Bild 72c zeigt die Tolerierung ohne \emptyset . Bild 72d ist die dazugehörige Erklärung. Die entsprechende Toleranzzone kann als welliger Quader mit quadratischem Querschnitt dargestellt werden. Die Breite des Querschnitts ist der Toleranzwert. Aufgrund des fehlenden Bezugssystems bei Formtoleranzen kann die Orientierung des Quaders nicht festgelegt werden. Zusätzlich kann, durch die unklaren Biegungsvektoren des Querschnitts an den Krümmungen des Schlauchs, die Orientierung des Querschnitts an diesen vier Krümmungen nicht festgelegt werden. Deshalb kann eine Mittellinie bei Formtoleranzen nur mit \emptyset definiert werden.

Für eine Ortstoleranz werden Bezüge oder ein Bezugssystem benötigt. Bild 72e zeigt ein Beispiel mit einem vollständigen Bezugssystem A, B und C. Dadurch ergibt sich der Ort der Toleranzzone. Sollte bei Ortstoleranzen kein \emptyset vorhanden sein (Bild 72f), ist die Toleranzzone ein Quader. Jedoch kann aus demselben Grund wie in Bild 72d die Orientierung des Querschnitts nicht durch die vier Krümmungen definiert werden. Deswegen gilt dieser Fall in Bild 72f nicht.

Bei der Richtungstoleranz werden ebenfalls Bezüge oder Bezugssysteme benötigt. Bild 72g zeigt das gleiche Beispiel mit einem „>“ (nur Nebenbedingung der Richtung) Modifikator, welcher hinter der tertiären Bezugsebene C angegeben ist. Das führt zu einer Richtungseinschränkung der Toleranzzone, so dass sich diese senkrecht zu C frei bewegen kann. Bild 72h stellt die Tolerierung ohne \emptyset dar. Aus dem oben genannten Grund kann die Orientierung der Quadertoleranzzone an der Krümmung des Schlauchs ebenfalls nicht definiert werden. Deswegen gilt Bild 72h nicht. Die neu entwickelte Systematik ist vollständig, da alle Toleranzarten der Tolerierung der abgeleiteten gekrümmten Mittellinien berücksichtigt werden. Nach der Analyse gilt die Toleranzangabe ohne \emptyset nicht für die Tolerierung der gekrümmten Mittellinie.

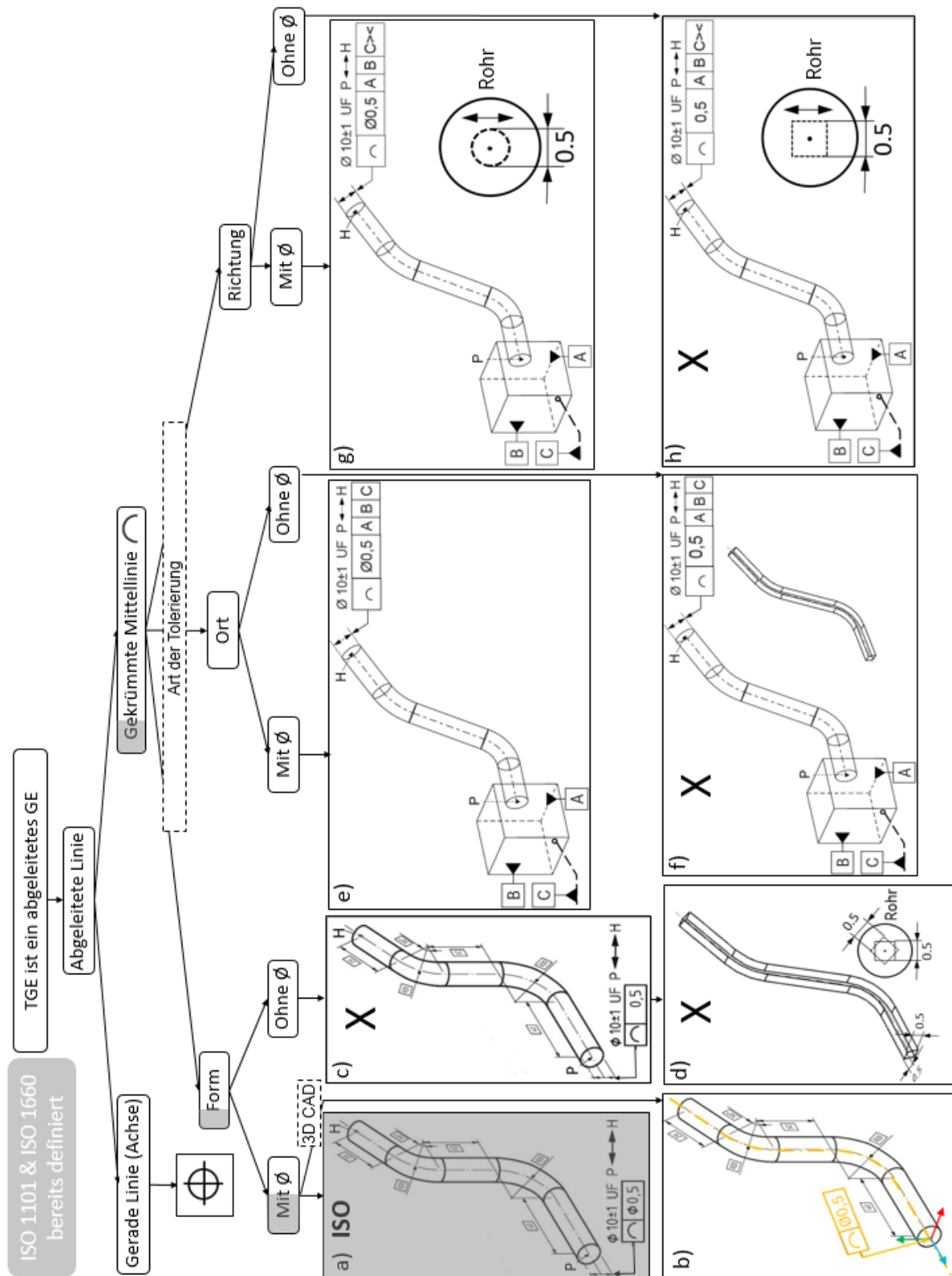


Bild 72 Gesamte Systematik für die Tolerierung einer abgeleiteten, gekrümmten Mittellinie mit Linienprofiltoleranz

7.2 Definition der Verbundtoleranz für Linienprofiltoleranz

In den ISO GPS Normen gibt es keine Definition für Verbundtoleranz, dies wurde bereits in Kapitel 2.1.3.2 beschrieben. Folgendes Kapitel bietet eine neu entwickelte Systematik auf Basis von ISO 1101 und ISO 1660 an, um eine logisch aufeinander aufgebaute Struktur und nachvollziehbare Definition der Verbundtoleranz für Linienprofiltoleranz darzustellen.

Bild 73 zeigt die Struktur des Kapitels. Je nach Toleranzart gibt es Orts-, Richtungs- und Formtoleranz. Wenn zwei oder mehrere Toleranzarten unter Anwendung des gleichen Toleranzsymbols für ein TGE verwendet werden, dann ist die kombinierte Toleranz eine Verbundtoleranz [250]. Nach den mathematischen Kombinationsmöglichkeiten der drei Toleranzarten ergeben sich vier Kombinationen. Diese werden in den folgenden Unterkapiteln im Detail beschrieben.

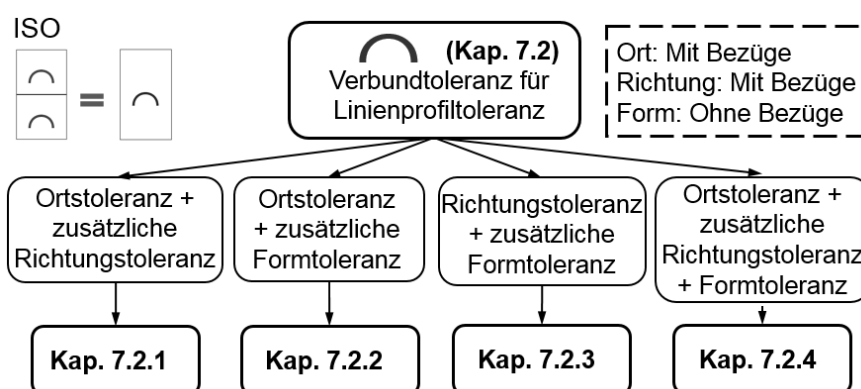


Bild 73 Gliederung des Kapitels: Verbundtoleranz für Linienprofiltoleranz

7.2.1 Ortstoleranz mit zusätzlicher Richtungstoleranz

Bild 74 zeigt eine neue Systematik mit neu entwickelter Definition zu Verbundtoleranz der Linienprofiltoleranz für Ort und Richtung. Je nach Bewegungsrichtung der Toleranzzone kann die Verbundtoleranz in drei Fälle unterteilt werden: horizontal, vertikal und eine Kombinationen dieser.

Bild 74a zeigt eine Schnittlinie auf der Oberfläche als TGE. Die Ortstoleranz ist eindeutig definiert und im Raum fixiert. Die zusätzliche Richtungstoleranzzone wird durch den Modifikator „><“ in horizontaler Richtung frei bewegt. Die Schreibweise von der Richtungstoleranz hat die gleiche Bedeutung, wenn das Bezugssymbol B mit „><“ zusammen weggelassen werden. Das TGE darf im Kreuzungsbereich von Ortstoleranz und Richtungstoleranz liegen.

Bild 74b zeigt den zweiten Fall von Orts- und Richtungsverbundtoleranz, wobei die Bewegungsrichtung der Toleranzzone vertikal ist, wenn das Symbol „><“ hinter der Bezugsebene C gekennzeichnet ist. Die andere Schreibweise nur mit der Bezugsebene A und B hat die gleiche Bedeutung. In den aktuellen ISO 1101 und ISO 1660 Normen wird ein neuer Modifikator für die Nebenbedingung der Richtung hinzugeführt – un spezifiziert linear versetzte Toleranzzone OZ (offset zone) [10, 15]. Mit OZ kann die Richtungstoleranzzone in diesem Fall ebenfalls in die vertikale Richtung bewegt werden. Jedoch existiert ein Widerspruch zwischen der Definition von OZ und der Definition von Richtungstoleranz. Nach ISO 1101 muss für eine Richtungstoleranz mindestens ein Bezug vorhanden sein. Auf Basis von ISO 1660 benötigt das OZ aber keine Bezüge. Hier existiert ein Widerspruch zwischen den beiden ISO Normen. Aufgrund der Definition von OZ ist die Spezifikation für die Richtungstoleranz ungenau. Deswegen wird die Verwendung des OZ nicht weiter empfohlen.

Bild 74c zeigt den letzten Fall von Orts- und Richtungsverbundtoleranz, wobei sich die Richtungstoleranzzone horizontal und vertikal frei bewegen kann, da der Modifikator “><“ hinter den Bezugsebenen B und C gekennzeichnet ist. Diese neue Systematik stellt alle Situationen der Orts- und Richtungsverbundtoleranz für eine Linienprofiltoleranz dar und bietet dazu die entsprechenden expliziten Definitionen.

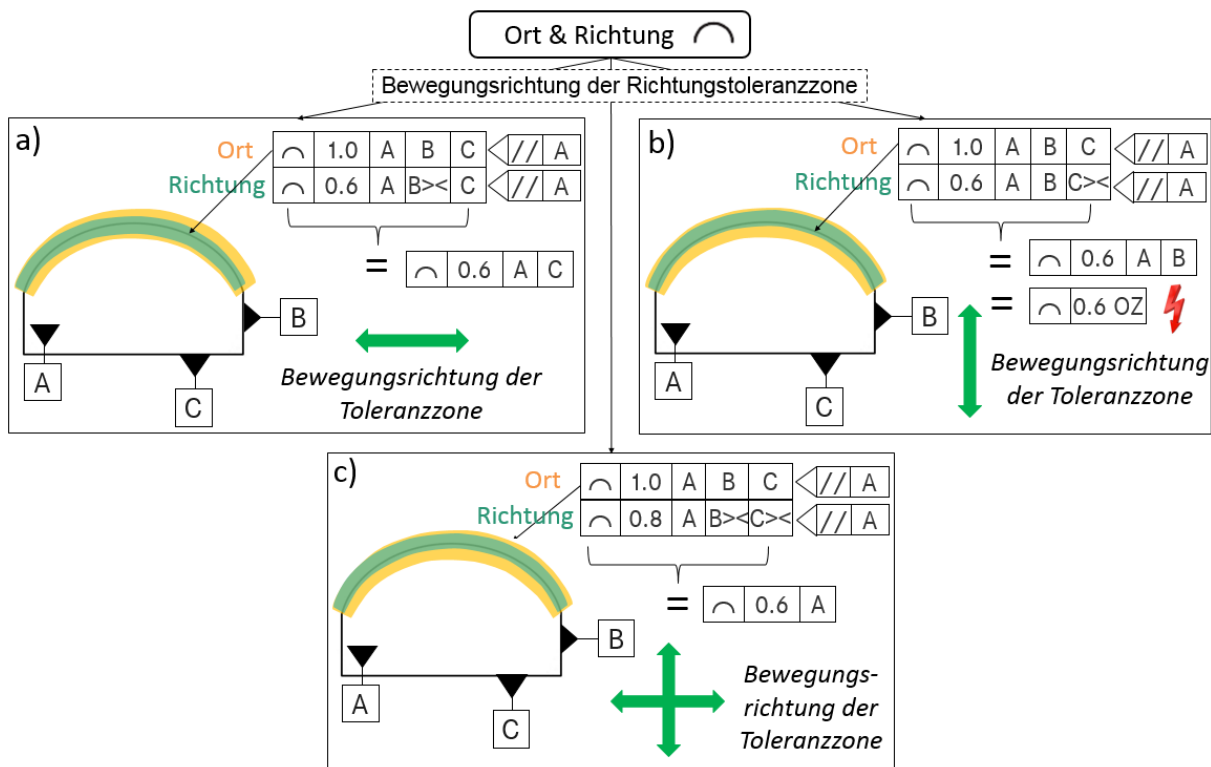


Bild 74 Verbundtoleranz der Linienprofiltoleranz: Ort und Richtung

7.2.2 Ortstoleranz mit zusätzlicher Formtoleranz

Eine weitere Kombination für die Verbundtoleranz der Linienprofiltoleranz ist die Ortstoleranz mit zusätzlicher Formtoleranz. Bild 75 zeigt die entsprechend entwickelte Systematik. Die Ortstoleranzzone der Schnittlinie ist im Raum fixiert. Die Formtoleranzzone besitzt eine Breite von 0.3 mm, welche in einer beliebigen Position innerhalb der Ortstoleranzzone liegt. Der Toleranzwert der Formtoleranz muss kleiner als die Ortstoleranz sein. Die funktionsbasierte Toleranzzone für die Schnittlinie ist der Kreuzungsbereich von Orts- und Formtoleranzzone. Die reale Schnittlinie darf eine beliebige Form innerhalb der Formtoleranzzone haben. Diese Definition füllt weiterhin die Definitionslücken in den ISO GPS Normen.

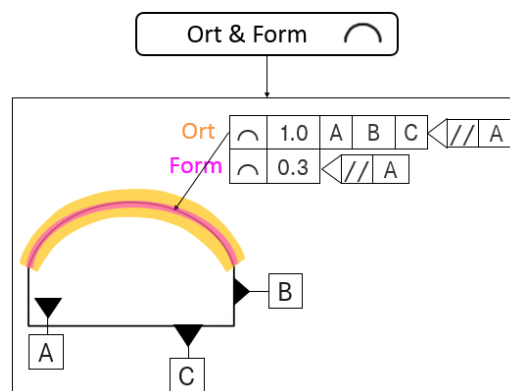


Bild 75 Verbundtoleranz der Linienprofiltoleranz: Ort und Form

7.2.3 Richtungstoleranz mit zusätzlicher Formtoleranz

Die dritte Kombination für die Verbundtoleranz der Linienprofiltoleranz ist die Richtungs- und Formtoleranz. Analog zu Bild 74 kann je nach Bewegungsrichtung der Toleranzzone von Richtungstoleranz zwischen drei Fällen unterschieden werden. Bild 76 zeigt die dazu neu entwickelte Systematik.

Bild 76a stellt den Modifikator „><“ hinter der Bezugsebene B dar, damit die Richtungstoleranzzone horizontal frei bewegt werden kann. Diese Schreibweise ist identisch mit der Schreibweise ohne die Bezugsebene B und „><“. Die Formtoleranz steht absichtlich in der zweiten Reihe der Verbundtoleranz, da ihr Toleranzwert immer am kleinsten ist. Die schmale Formtoleranzzone bewegt sich innerhalb der Richtungstoleranzzone. Der gemeinsame, resultierende Kreuzungsbereich ist die definierte Toleranzzone der Verbundtoleranz für das TGE. Analog zu Denkmodell von Bild 76a können die anderen zwei Fälle (Bild 76b und Bild 76c) ebenfalls mit dieser Methode definiert werden.

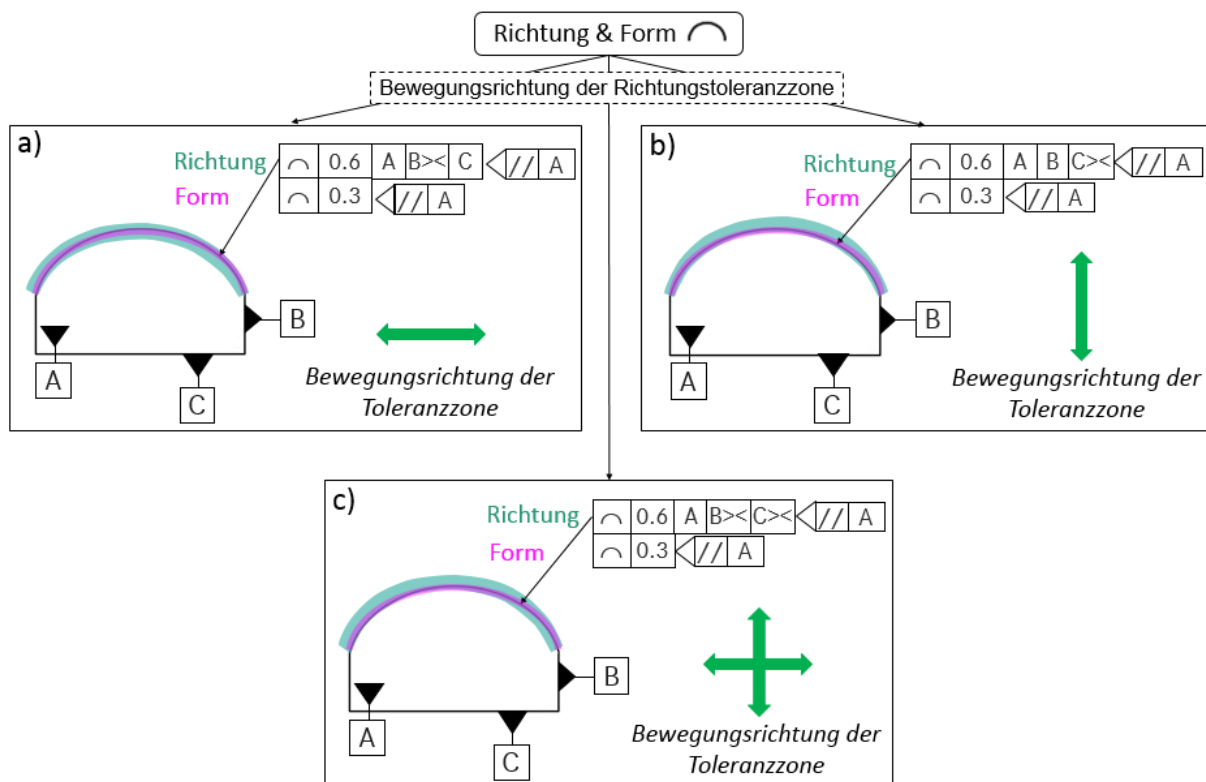


Bild 76 Verbundtoleranz der Linienprofiltoleranz: Richtung und Form

7.2.4 Ortstoleranz mit zusätzlicher Richtungs- und Formtoleranz

Die letzte Kombinationsmöglichkeit für die Verbundtoleranz der Linienprofiltoleranz ist die Ortstoleranz mit zusätzlicher Richtungs- und Formtoleranz. Logischerweise soll der Ort eines TGE zuerst eingeschränkt werden, deshalb besitzt die Ortstoleranz den größten Toleranzwert. Anschließend wird die Richtung des TGE eingeschränkt, daher ergibt sich der zweitgrößte Toleranzwert der Verbundtoleranz. Schließlich wird die Form des TGE eingeschränkt, diese besitzt den kleinsten Toleranzwert. Nach der Größe des Toleranzwerts wird zuerst die Ortstoleranz in der ersten Reihe definiert. Erst danach kommen die Richtungstoleranz und Formtoleranz hinzu.

Bild 77 zeigt die dazu neu entwickelte Systematik. Bild 77a stellt die Verbundtoleranz mit den drei Toleranzarten dar. Die Ortstoleranz ist im Raum fixiert. Die Richtungstoleranz kann durch den Einsatz des Modifikators „> <“ hinter der Bezugsebene B horizontal frei bewegt werden. Die Formtoleranzzone kann sich innerhalb der Richtungstoleranzzone frei bewegen. Die resultierende Toleranzzone für die Schnittlinie ist der Kreuzungsbereich von allen drei Toleranzzonen. In Bild 77b und Bild 77c werden auf Basis desselben Denkmodells die zwei weiteren Verbundtoleranzen definiert.

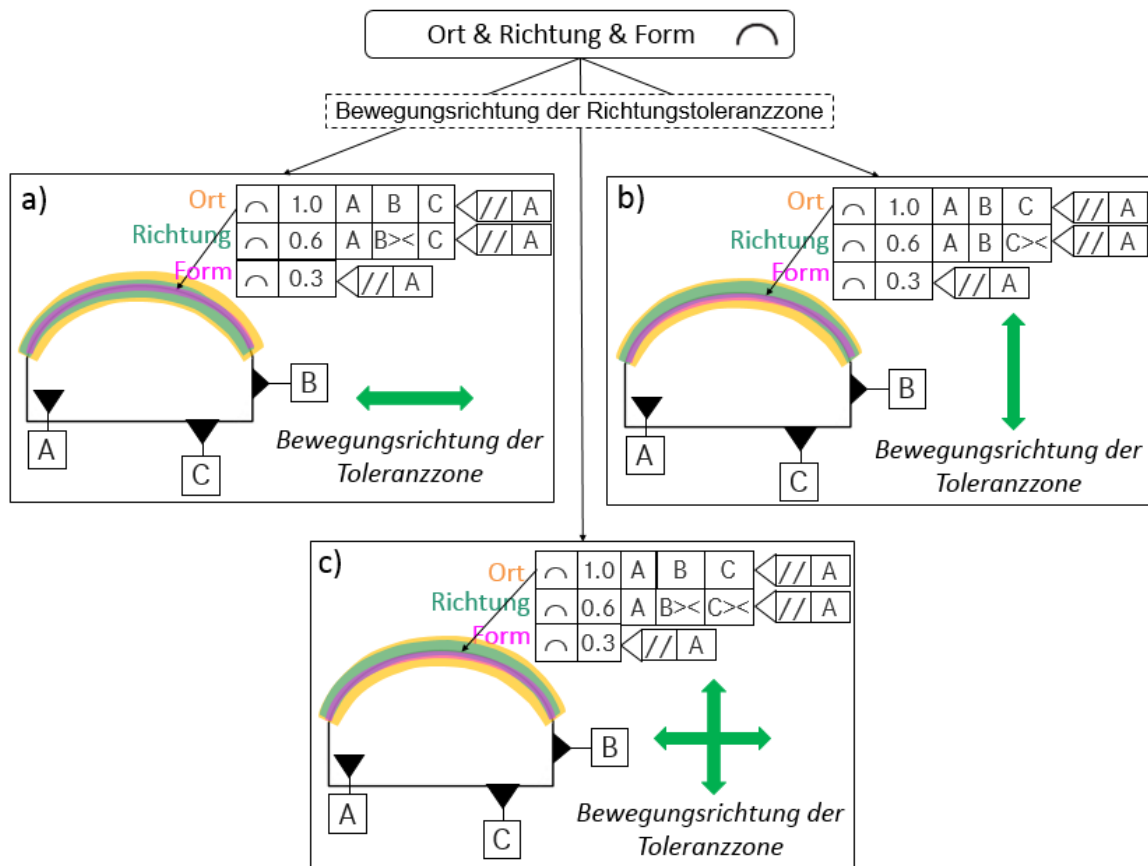


Bild 77 Verbundtoleranz der Linienprofilltoleranz: Ort, Richtung und Form

7.3 Definition der Verbundtoleranz für die Flächenprofilltoleranz

Dieses Kapitel verfolgt dasselbe Denkmodell und dieselbe Systematik wie bei der Analyse der Verbundtoleranz für die Linienprofilltoleranz. Es existieren jedoch einige Unterschiede, da das TGE für eine Linienprofilltoleranz eine Schnittlinie und für eine Flächenprofilltoleranz eine Fläche ist. Wie bereits in Kapitel 2.1.3.2 beschrieben wurde, gibt es in den ISO GPS Normen keine Definition für die Verbundtoleranz. In ASME Y14.5 gibt es dazu zwar konkrete Beispiele und Definitionen, dennoch ist die Aufbaustruktur der Verbundtoleranz unlogisch bzw. zufällig und unvollständig. Die neu entwickelte Systematik gilt nicht nur für ISO GPS Normen, sondern auch für ASME Y14.5. Zudem wird die Translation der Schreibweise zwischen ISO GPS und ASME Y14.5 dargestellt. Bild 78 zeigt dazu die Gliederung dieses Kapitels.

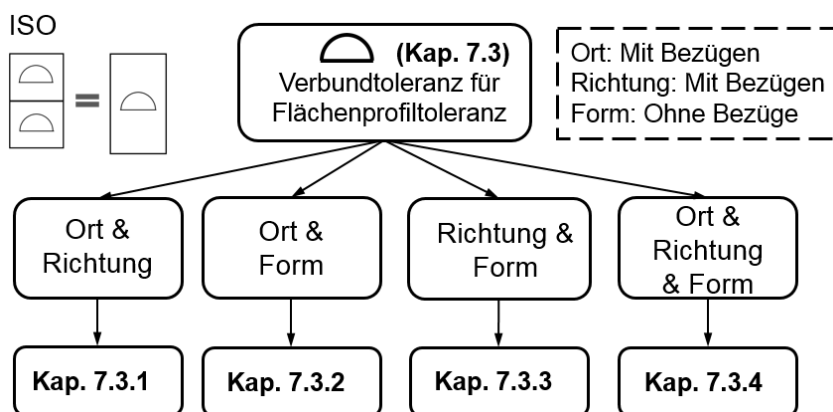


Bild 78 Gliederung des Kapitels: Verbundtoleranz für Flächenprofiltoleranz

7.3.1 Ortstoleranz mit zusätzlicher Richtungstoleranz

Bild 79a stellt die Ortstoleranz mit horizontal beschränkter Richtungstoleranz dar. Die gezeichnete ASME Y14.5 Schreibweise hat die gleiche Bedeutung wie in ISO. In Bild 79b hat ASME Y14.5 keine entsprechende Schreibweise und Definition. Bild 79c zeigt zusätzlich eine Seitenansicht des Bauteils. Die Richtungstoleranzzone muss senkrecht zur Oberfläche sein, da die Bezugsebene A mit dem Richtungstoleranzindikator gekennzeichnet ist. Gleichzeitig kann die Richtungstoleranzzone horizontal und vertikal bewegt werden. Die Schreibweise von ASME Y14.5 hat dieselbe Bedeutung wie in ISO GPS.

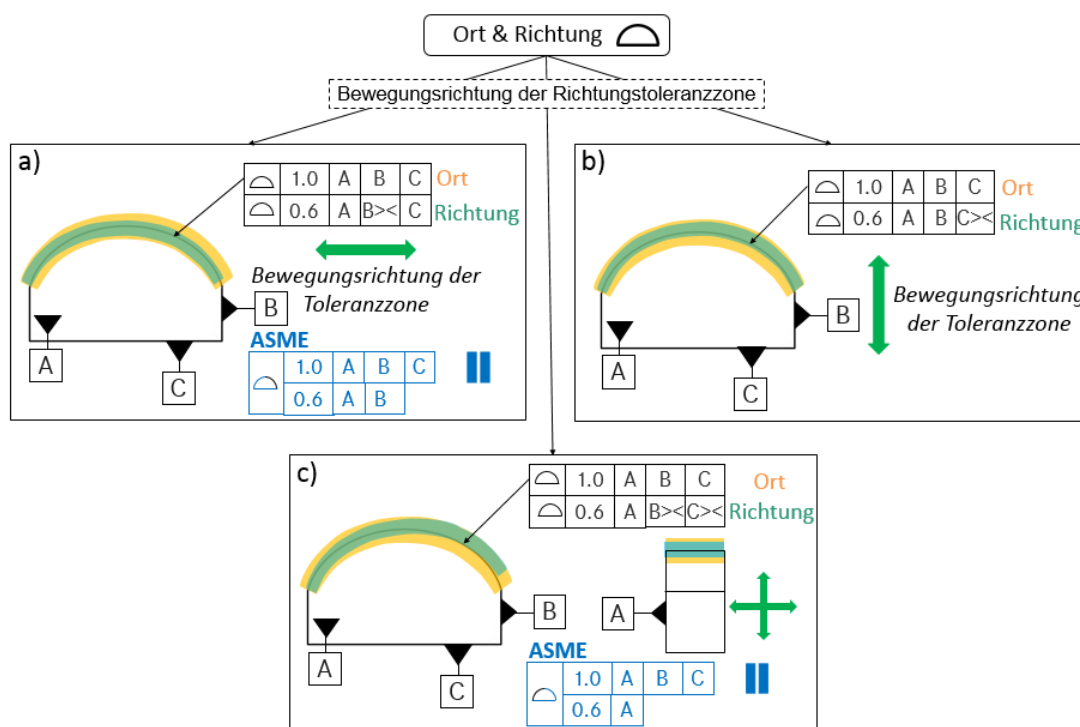


Bild 79 Verbundtoleranz der Flächenprofiltoleranz: Ort und Richtung

7.3.2 Ortstoleranz mit zusätzlicher Formtoleranz

Die zweite Kombination für die Verbundtoleranz der Flächenprofilltoleranz ist die Ortstoleranz mit zusätzlicher Formeinschränkung (Bild 80). Die entsprechende Definition kann analog zur Linienprofilltoleranz in Kapitel 7.2.2 beschrieben werden. Der einzige Unterschied ist, dass das TGE nun eine Fläche ist. In ASME Y14.5 gibt es dazu weder eine Definition, noch Beispiele über die Orts- und Formverbundtoleranz.

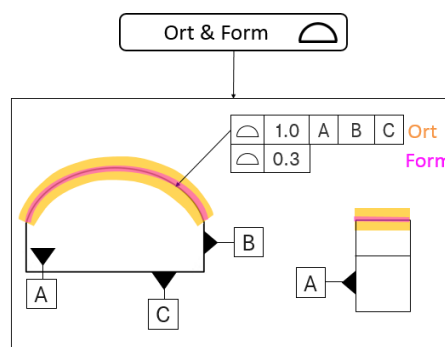


Bild 80 Verbundtoleranz der Flächenprofilltoleranz: Ort und Form

7.3.3 Richtungstoleranz mit zusätzlicher Formtoleranz

Bild 81 zeigt die entwickelte Systematik für die Verbundtoleranz der Flächenprofilltoleranz: Richtung und Form. Diese Systematik besitzt die gleiche Analysemethode wie in Bild 76. In ASME Y14.5 wird diese Art von Verbundtoleranz nicht definiert.

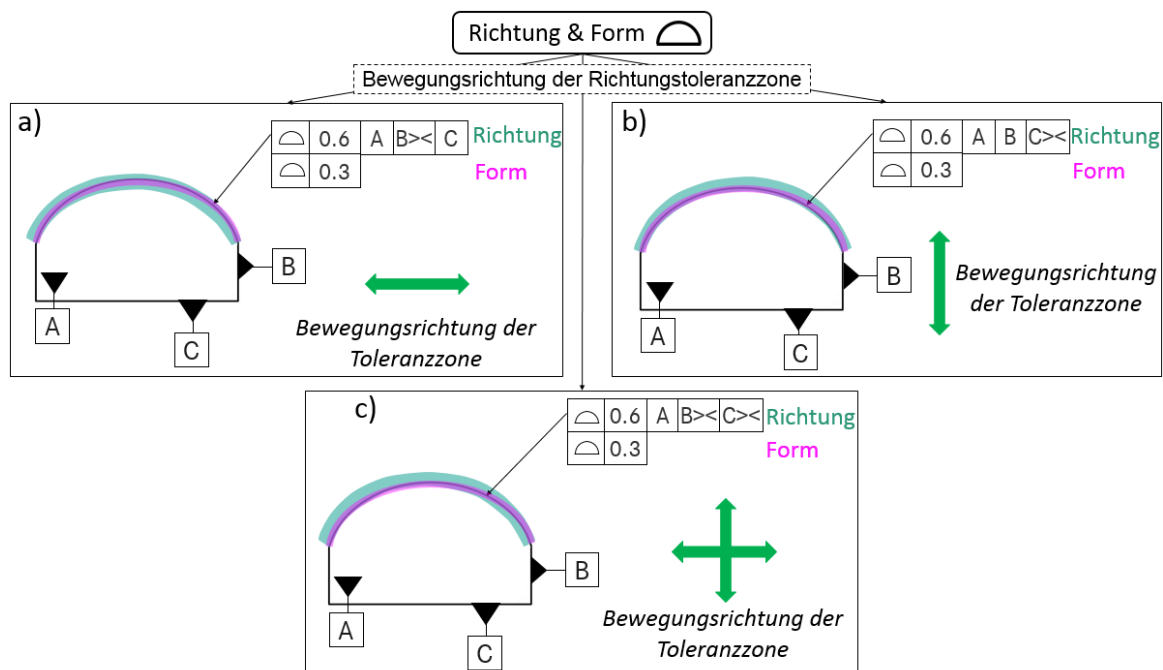


Bild 81 Verbundtoleranz der Flächenprofilltoleranz: Richtung und Form

7.3.4 Ortstoleranz mit zusätzlicher Richtungs- und Formtoleranz

Bild 82 zeigt die neu entwickelte Verbundtoleranz aller drei Toleranzarten: Ort, Richtung und Form. Das Denkmodell ist dasselbe wie in Bild 77. Gemäß Bild 82a und Bild 82b gibt es in ASME Y14.5 keine entsprechenden Definitionen und Beispiele.

Bild 82c stellt die Verbundtoleranz dar, welche die Richtungstoleranzzone horizontal und vertikal bewegen kann. Die Orts-, Richtungs- und Formtoleranz sind gemäß des Toleranzwerts (1,0 mm, 0,6 mm und 0,3 mm) von oben nach unten gekennzeichnet. In ASME Y14.5 wird eine Schreibweise definiert, bei welcher die Reihenfolge der Toleranzart unabhängig von der Größe des Toleranzwerts ist. Die Formtoleranz wird auf dem ersten Platz mit dem Modifikator „INDIVIDUALLY“ definiert. Die Ort- und Richtungstoleranz wird zusammen in ein Feld geschrieben. In ASME Y14.5 gibt es nur Definitionen für die folgenden zwei Verbundtoleranzen: Ort, Richtung und Form; Ort und Richtung. Alle anderen Fälle hat ASME Y14.5 nicht definiert. Die hier entwickelte Systematik bietet eine vollständige Kombination aller Verbundtoleranzarten an und füllt die Definitionslücke beider internationaler Toleranznormen.

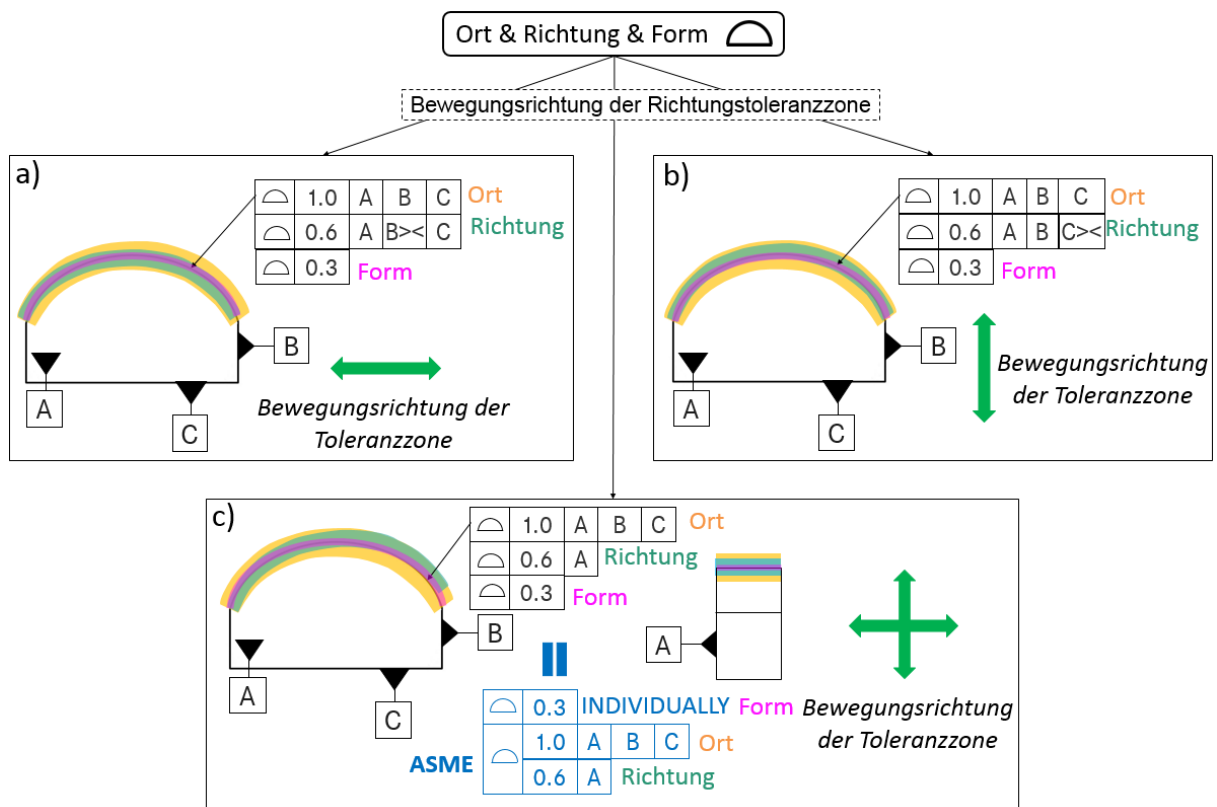


Bild 82 Verbundtoleranz der Flächenprofilltoleranz: Ort, Richtung und Form

8 Systematik für Positionstoleranz

Dieses Kapitel beschreibt den letzten Handlungsbedarf bei der Tolerierung, welche die Definition der Positionstoleranz für ein einzelnes GE (Kapitel 8.1) und für die Mustertolerierung (Kapitel 8.2) aus ISO 1101 und ISO 5458 erweitert und ergänzt.

8.1 Ergänzung und Erweiterung der Definition der Positionstoleranz

Die Definition und Defizite der Positionstoleranz wurden bereits in Kapitel 2.1.4.1 beschrieben. Bild 83 zeigt die dazu neu entwickelte Systematik. Je nach Herkunft des TGE kann in reales und abgeleitetes GE unterteilt werden. Das reale GE kann wiederum in einen realen Punkt, eine reale Gerade und eine reale Ebene unterteilt werden. Analog zum realen GE wird das abgeleitete GE ebenfalls in Punkt (z.B. Mittelpunkt), Gerade (z.B. Achse) und Mittelebene unterteilt. Die in ISO 1101 genannten Definitionen wurden in Bild 15 und Bild 18 dargestellt. Die ergänzten Definitionen werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

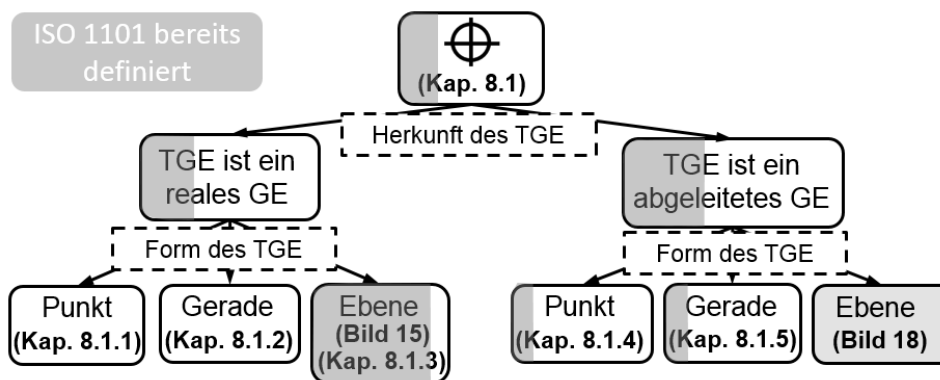


Bild 83 Gesamte Systematik der Positionstoleranz für ein einzelnes GE

8.1.1 Realer integraler Punkt als toleriertes Geometrieelement

In ISO GPS ist ein punktförmiges TGE immer der Mittelpunkt einer Kugel. Ein realer integraler Punkt wird in ISO nicht berücksichtigt. Bild 84 zeigt dazu eine neu entwickelte Systematik für die Tolerierung eines realen integralen Punkts mit Positionstoleranz [251]. Je nach Herkunft des TGE kann zwischen zwei Fällen unterschieden werden: das TGE ist entweder ein Punkt auf einer Fläche/Linie, oder ein Eckpunkt.

Beim „Punkt auf einer Fläche“ gibt es zwei konkrete Fälle: Punkt auf einer beliebigen Fläche (Bild 84a) und höchster Punkt einer Kugelfläche (Bild 84c). Es gibt insgesamt drei Angabemöglichkeiten im Toleranzindikator, um die Form der Toleranzzone vom TGE bei einer Positionstoleranz zu definieren. Diese sind das \emptyset , das sphärische $S\emptyset$ sowie diejenige ohne Angabe des \emptyset . In Bild 84a kann die Spezifikation des Punkts nur ohne Angabe des \emptyset im Toleranzindikator angegeben werden, da der 0D (null dimensionaler) Punkt auf einer 2D Ebene liegt. Diese Ebene kann nur in eine Richtung bewegt werden. Die resultierende Toleranzzone des tolerierten Punkts ist eine 1D Linie und die Länge beträgt 2,0 mm (Toleranzwert). Bild 84b illustriert die entsprechende Toleranzzone. Der Punkt in dieser Linie ist das TGE sowie das theoretisch exakte Element. Der Punkt darf nicht mit \emptyset spezifiziert werden, da die Orientierung der Kreisscheibe von der Toleranzzone nicht definiert werden kann. Zusätzlich widerspricht die 2D Kreisscheibe der Realität der physikalischen Bewegungszonen des Punkts. Aus demselben Grund darf $S\emptyset$ in diesem Fall ebenso nicht verwendet werden.

Bild 84c-e zeigt die Tolerierung des höchsten Punkts auf einer Kugelfläche. Es gibt insgesamt zwei Möglichkeiten, um die Positionstoleranz dieses höchsten Punkts zu spezifizieren. Eine ist mit Angabe des $S\emptyset$, da die Kugelfläche eine räumliche (3D) Toleranzzone besitzt und der Punkt auf dieser Kugelfläche liegt ist. Daher kann der Punkt nur dreidimensional im Raum bewegt werden. Die entsprechende Toleranzzone ist eine sphärische Toleranzzone (Bild 84d). Die Positionsspezifikation kann auch ohne Angabe des \emptyset definiert werden, die entsprechende Toleranzzone ist ein Würfel (Bild 84e). Diese würfelförmige Toleranzzone ohne Angabe des \emptyset ist das neue Konzept der Form der Toleranzzone, welche in ISO GPS Normen nicht beschrieben wird. Der Punkt kann nicht mit \emptyset spezifiziert werden, da sich der Punkt nicht in einem zweidimensionalen Bereich bewegt.

Bild 84f zeigt einen Punkt, welcher auf einer Linie (in diesem Fall einer Kante) eines Bauteils liegt. Es gibt zwei Möglichkeiten, um die Positionstoleranz des Punkts zu spezifizieren: mit \emptyset und ohne \emptyset . Der Punkt liegt auf einer Linie. Die Linie kann nur in zwei Richtungen (Y und Z) bewegt werden, da die Linie durch die obere und vordere Ebene entsteht. Daher kann der Punkt auf dieser Linie ebenfalls nur in zwei Richtungen (Y und Z) bewegt werden. Folglich besitzt die Toleranzzone zwei Dimensionen. Bild 84g (kreisförmig) und Bild 84h (quadratisch) stellen die entsprechenden Toleranzzonen mit und ohne \emptyset dar. Die quadratische Toleranzzone ist ebenfalls ein neues Konzept für die Form der Toleranzzone in den ISO GPS Normen. Der Punkt

darf nicht mit $S\emptyset$ spezifiziert werden, da der reale Bewegungsbereich des Punkts nur in 2D beschränkt wird.

Bild 84i-k zeigt die Tolerierung eines Eckpunkts. Um diesen Eckpunkt zu tolerieren, gibt es zwei Angabemöglichkeiten: mit $S\emptyset$ und ohne $S\emptyset$. Dieser Eckpunkt wird von drei senkrecht zueinander stehenden Ebenen erzeugt und kann in allen Raumrichtungen bewegt werden. Deshalb ist der Bewegungsbereich des Eckpunkts 3D. Bild 84j (sphärisch) und Bild 84k (würfelförmig) stellen die entsprechenden Toleranzzonen mit und ohne $S\emptyset$ dar.

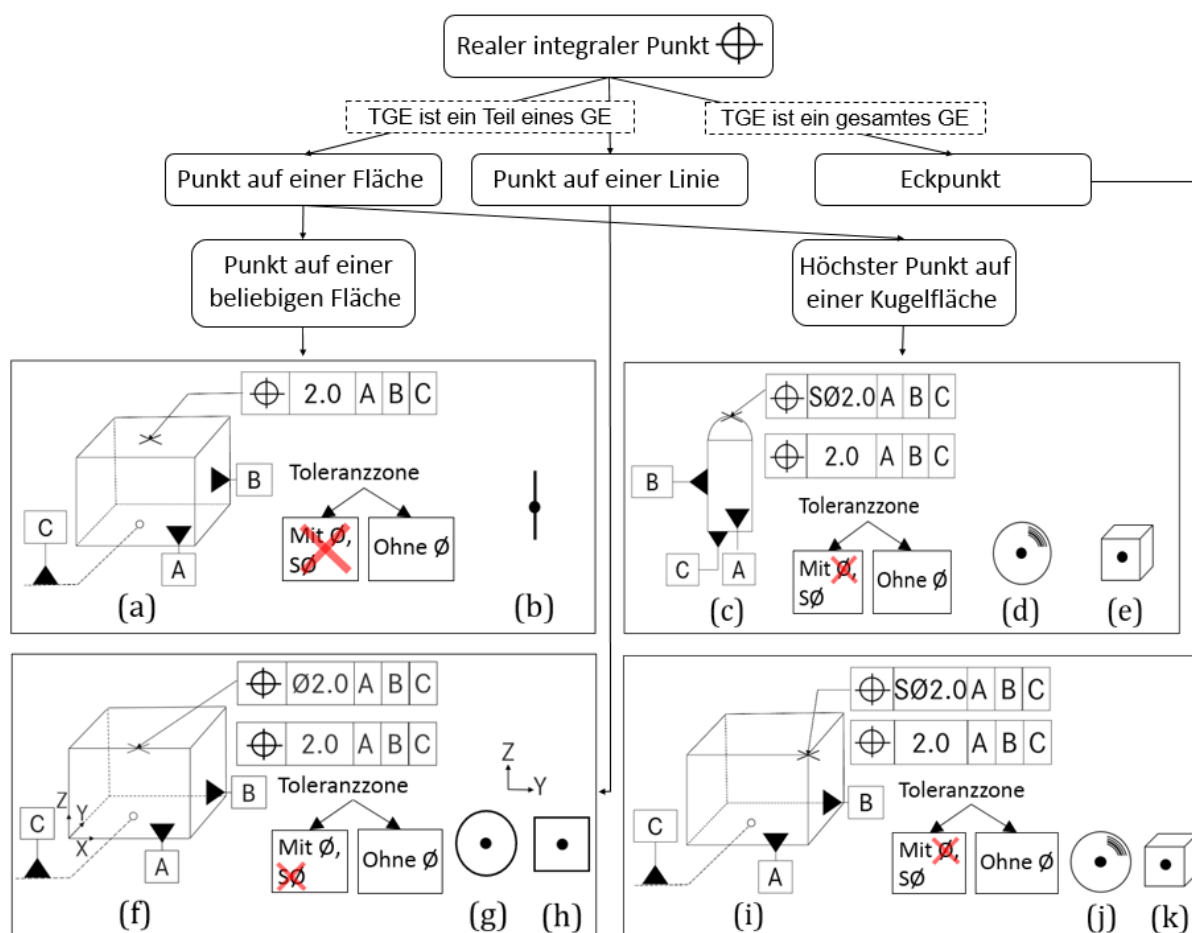


Bild 84 Gesamte Systematik für die Positionstolerierung eines realen integralen Punkts

8.1.2 Reale integrale Gerade als toleriertes Geometrieelement

Bild 85 zeigt die neue Systematik für die Positionstolerierung einer realen integralen Geraden. Je nach Herkunft des TGE kann zwischen einer Geraden auf einer Fläche und einer gesamten Linie unterschieden werden. Bild 85a zeigt eine Gerade, welche auf einer Ebene liegt. Diese Ebene kann nur in Z-Richtung bewegt werden, aus diesem Grund gilt dasselbe für die Gerade. Die resultierende Toleranzzone für diese Gerade sind zwei parallel zueinander liegende Linien

(Bild 85b). Es kann kein \emptyset angegeben werden, da die Orientierung der Kreisscheibe nicht eindeutig definiert werden kann. Gemäß ISO GPS darf die Orientierungsebene nicht für ein reales integrales GE verwendet werden. $S\emptyset$ kann ebenfalls nicht angewendet werden, da die Toleranzzone 2D ist.

Bild 85c zeigt die Positionstolerierung einer Kante von dickwandigem Bauteil. Es gibt zwei Angabemöglichkeiten, um die Position der Kante zu spezifizieren: mit \emptyset und ohne \emptyset . Die Kante stammt aus oberen und seitlichen Ebenen. Deshalb kann die Kante in zwei Richtungen (X und Z) bewegt werden. Diese Kante ist eindimensional (1D). Zusammen mit den zwei Bewegungsrichtungen ist die resultierende Toleranzzone 3D. Bild 85d illustriert die zylindrische Toleranzzone mit Angaben des \emptyset . Bild 85e zeigt den Quader als Toleranzzone ohne Angaben des \emptyset . Wenn die Seitenebene und die Kante unterschiedliche Toleranzwerte haben, kann eine Konfliktzone zwischen den Toleranzzonen entstehen. Bild 85f illustriert diese Konfliktzone bei einer Draufsicht des Bauteils. Beispielsweise ist $t=0,5$ mm der Toleranzwert der Kante und $t=1,0$ mm der Toleranzwert der Seitenebene. Da diese Kante an der Seitenebene liegt, gibt es eine physikalisch existierende Konfliktzone. Das führt zur Unklarheit der Toleranzzone der Kante. In diesem Fall entscheidet die Funktion der Kante, welcher Toleranzwert für die Kante gilt. Wenn die Funktion der Kante mit dem Toleranzwert 1,0 mm bestätigt würde, dann gälte der kleinste Toleranzwert 0,5 mm.

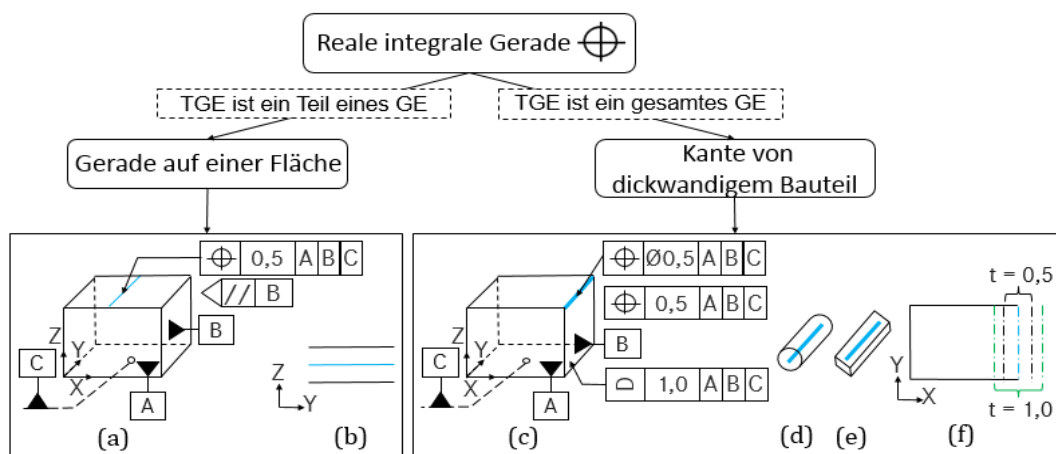


Bild 85 Gesamte Systematik für die Positionstolerierung einer realen integralen Gerade

8.1.3 Reale Ebene als toleriertes Geometrieelement

Die Positionstolerierung einer realen Ebene in ISO 1101 wurde bereits in Kapitel 2.1.4.1 in Bild 15 definiert. Jedoch gibt es einen Definitionswiderspruch für die Positionstoleranz zwischen der realen Ebene und dem realen Punkt. Bild 86 zeigt dazu ein Beispiel. Ein Bauteil

besitzt drei senkrecht zueinander liegende Ebenen als Bezugssystem. Es gibt zwei TGE: die schräge Ebene und den Punkt auf dieser Ebene. Die beiden TGE sind mit dem gleichen Toleranzindikator spezifiziert. Auf Basis von ISO 1101 ist die Richtung der Breite der Toleranzzone orthogonal zur Ebene. Die Richtung der Breite der Toleranzzone des Punkts soll gemäß ISO nach seinem Bezugssystem orientiert werden (siehe Pfeile in Bild 86b). Das resultiert in zwei unterschiedlichen Richtungen und führt zu einem Definitionswiderspruch. Die Richtung des Punkts entspricht nicht der Realität. Da der Punkt auf der Ebene liegt, soll der Punkt die gleiche Bewegungsrichtung haben. Ein Vorschlag lautet: die Toleranzzone soll immer nach der Funktion des TGE definiert werden.

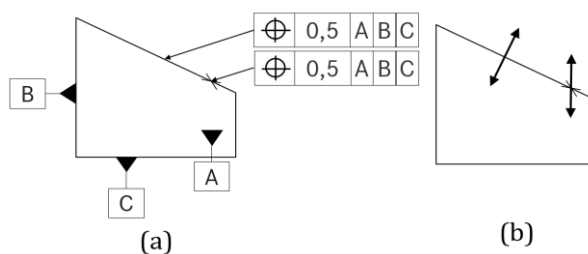


Bild 86 Definitionswiderspruch zwischen der realen Ebene und dem realen Punkt

8.1.4 Abgeleiteter Punkt als toleriertes Geometrielement

Bild 87 zeigt die neu entwickelte Systematik für die Positionstolerierung eines abgeleiteten Punkts. Je nach Herkunft des TGE kann zwischen vier Fällen unterschieden werden: Mittelpunkt einer Kugel; Mittelpunkt eines Kreises; Mittelpunkt eines Durchbruchs aus einem dünnwandigen Bauteil und Zentrierungspunkt.

Bild 87a zeigt den ersten Fall: die Tolerierung eines Mittelpunkts einer Kugel. In ISO 1101 wird die Toleranzzone für einen solchen Mittelpunkt nur als sphärische Toleranzzone definiert (Bild 87b). Die Toleranzzone kann auch würfelförmig sein, wenn kein $S\emptyset$ vorhanden ist (Bild 87c). Bild 87d zeigt die 3D CAD Darstellung der Tolerierung des Mittelpunkts. Aufgrund der Updatestabilität kann der Toleranzindikator direkt mit dem Mittelpunkt verbunden werden.

Bild 87e zeigt den zweiten Fall: die Positionstolerierung eines Mittelpunkts von einem Kreis. Das TGE ist der Mittelpunkt des beliebigen kreisförmigen Querschnitts der Bohrung. Es gibt insgesamt zwei Möglichkeiten, um diesen Mittelpunkt zu tolerieren. Ist die entsprechende Toleranzzone kreisförmig, dann wird mit \emptyset toleriert (Bild 87f), ist die entsprechende Toleranzzone ein 2D Quadrat, dann wird ohne \emptyset toleriert (Bild 87g). $S\emptyset$ darf in diesem Fall nicht verwendet werden, da sich dieser Mittelpunkt in einem 2D Bereich bewegt.

Bild 87h-p zeigt den dritten Fall der Positionstolerierung eines Mittelpunkts eines Durchbruchs aus einem dünnwandigen Bauteil. Bild 87h zeigt ein dünnwandiges Bauteil mit einem kreisförmigen Durchbruch. Das TGE ist der Mittelpunkt des Durchbruchs. Die Toleranzzone kann analog zu Bild 87e-g definiert werden. Wenn die Bezüge im Bezugssystem nicht senkrecht zueinander liegen oder wenn das TGE nicht senkrecht zum Bezugssystem liegt, werden solche Fälle als „Derivat“ bezeichnet. In den ISO GPS Normen existiert ein solcher Fall für den Durchbruch nicht. Bild 87k zeigt ein dünnwandiges Bauteil mit drei schräg zueinander stehenden Bezügen. Es gibt zwei Angabemöglichkeiten, um den Mittelpunkt des Durchbruchs zu spezifizieren. Ist die resultierende Toleranzzone kreisförmig, dann wird \emptyset verwendet (Bild 87f). Ein Kreis besitzt keine Richtung, deswegen muss die Toleranzzone nicht zum Bezugssystem orientiert werden. Das TGE kann auch ohne \emptyset spezifiziert werden. Das ergibt eine Raute als Toleranzzone (Bild 87m). Die Orientierung der Raute ist nach dem Bezugssystem orientiert, deswegen ist die Toleranzzone eine Raute, kein Quadrat. Bild 87n zeigt das andere Derivat, wobei das TGE nicht parallel oder senkrecht zum Bezugssystem liegt. Es gibt ebenfalls zwei Angabemöglichkeiten, um den Mittelpunkt des Durchbruchs zu tolerieren: mit \emptyset und ohne \emptyset . Die entsprechende Toleranzzone ist eine Kreisscheibe (Bild 87o) und ein Quadrat (Bild 87p). Die Orientierung der jeweiligen Toleranzzone ist nach der Funktion des Mittelpunkts definiert.

Bild 87q-r zeigt den letzten Fall der Positionstolerierung eines Zentrierungspunkts. Es gibt zwei Arten von Zentrierungspunkten: der Zentrierungspunkt von zwei Kugeln und von zwei Durchbrüchen. Das TGE in Bild 87q ist der Zentrierungspunkt der zwei Mittelpunkte der Kugeln. Jedoch kann dieser Zentrierungspunkt nicht ISO konform in der Zeichnung gekennzeichnet werden, weil der Zentrierungspunkt ein abgeleitetes GE ist und eine mehrfache Ableitung nicht in ISO GPS Normen beschrieben ist. Der Lösungsvorschlag ist, dass die mehrfache Ableitung durch eine Toleranzangabe an der Bemaßung des Abstands der abgeleiteten GE anzugeben ist. Alternativ kann dies in einem 3D CAD Programm toleriert werden. Die Toleranzzone für diesen Zentrierungspunkt kann sphärisch oder würfelförmig sein. Das hängt davon ab, ob diese mit \emptyset oder ohne \emptyset angegeben wird. Bild 87r zeigt die Positionstolerierung des Zentrierungspunkts von zwei Durchbrüchen aus einem dünnwandigen Bauteil. Analog zu Bild 87q kann dieser Zentrierungspunkt ebenfalls nicht ISO konform dargestellt werden. Dies soll direkt in einem 3D CAD Programm toleriert werden. Der Zentrierungspunkt besitzt einen 2D Bewegungsbereich, deshalb kann der Toleranzindikator mit

Ø oder ohne Ø angegeben werden. Die entsprechenden Toleranzzonen sind entweder kreisförmig oder quadratisch.

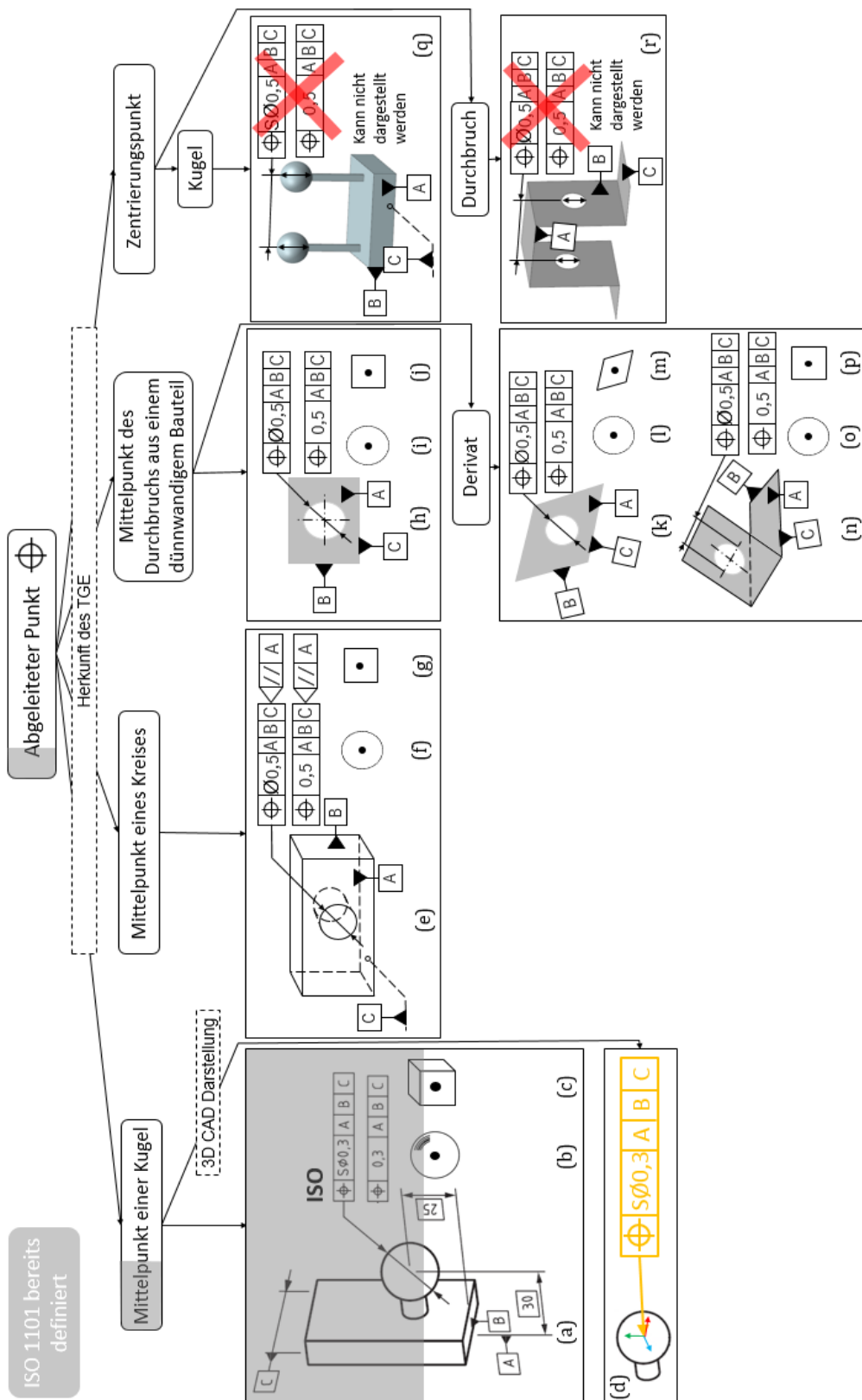


Bild 87 Gesamte Systematik für die Positionstolerierung eines abgeleiteten Punkts

8.1.5 Abgeleitete Gerade als toleriertes Geometrieelement

Bild 88 zeigt die neue Systematik für die Positionstolerierung einer abgeleiteten Geraden. Je nach Herkunft des TGE kann zwischen fünf Fällen unterschieden werden: Achse, gekrümmte Mittellinie, mittlere Linie, mittlere Achse und Mittelschnittlinie. Bild 88a zeigt eine Achse als TGE. Die Achse kann mit und ohne \emptyset toleriert werden. In ISO wird diese mit \emptyset definiert, die Toleranzzone ist zylindrisch (Bild 88b). Bei der Angabe ohne \emptyset ist die Toleranzzone ein Quader (Bild 88c). Bild 88d zeigt dazu die 3D Tolerierung. Die Bilder 88e und 88h stellen die Derivate der Tolerierung der Achse dar. Die Toleranzzone kann ebenfalls mit und ohne \emptyset definiert werden. Mit \emptyset ist die Toleranzzone zylindrisch (Bild 88f,i) und ohne \emptyset quaderförmig (Bild 88g,j). Die Orientierung der Toleranzzone soll nach der Funktion definiert werden.

Bild 88k zeigt eine gekrümmte Mittellinie als TGE. Auf Basis von ISO 1660 kann die Positionstoleranz für die Tolerierung einer gekrümmten Mittellinie verwendet werden (Bild 17b) [15]. Jedoch wird in ISO 1101 beschrieben, dass die Positionstoleranz nur für eine gerade Linie verwendet werden darf. Für eine nicht gerade Linie soll die Linienprofilltoleranz verwendet werden [10]. Dies ist ein Definitions widerspruch zwischen den beiden ISO Normen [252]. Das internationale technische Komitee ISO/TC 213 sollte entscheiden, welche Definition korrekt ist und diesen Widerspruch umgehend beseitigen.

Bild 88l-o zeigt den dritten Fall. Das TGE ist die mittlere Linie eines Durchbruchs aus einem dünnwandigen Bauteil. Bild 88l zeigt einen quadratischen Durchbruch. Das TGE ist jeweils die mittlere Linie der vier Kanten. Die Toleranzzone der mittleren Linie besteht aus zwei parallelen Linien. Die gleiche Analyse gilt ebenfalls für einen rechteckigen Durchbruch in Bild 88m. Bei einem Langloch kann nur die horizontale, mittlere Linie ISO-konform gezeichnet werden und ihre Toleranzzone besteht aus zwei horizontalen, parallelen Linien. Die vertikale mittlere Linie kann aus demselben Grund in Kapitel 8.1.4 nicht ISO konform dargestellt werden. Bild 88o zeigt ein Schlüsselloch und das TGE ist die vertikale mittlere Linie. Die Toleranzzone besteht hier aus zwei vertikalen parallelen Linien.

Bild 88p zeigt die Positionstolerierung einer mittleren Achse. Das TGE ist die mittlere Achse der zwei Achsen aus dem linken und rechten Zylinder. Das TGE kann nach ISO nicht dargestellt werden und sollte in 3D CAD toleriert werden. Die entsprechende Toleranzzone kann zylindrisch oder quaderförmig sein. Bild 88q zeigt die Positionstolerierung einer Mittelschnittlinie. Das TGE ist eine beliebige Linie in der Mittelebene der zwei Seitenebenen. Die entsprechende Toleranzzone besteht wieder aus zwei parallelen Linien (Bild 88r).

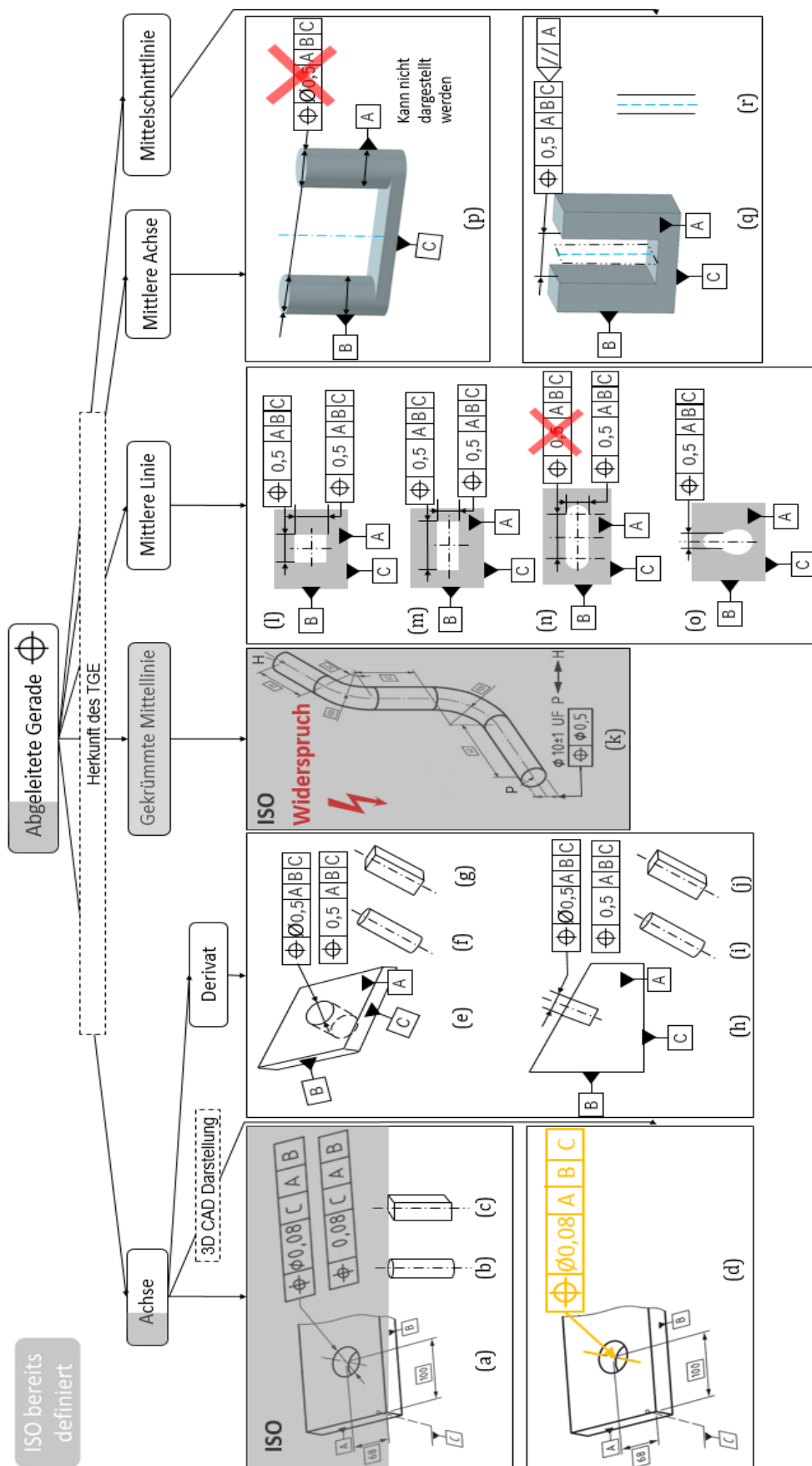


Bild 88 Gesamte Systematik für die Positionstolerierung einer abgeleiteten Gerade

8.2 Ergänzung und Erweiterung der Definition der Positionstoleranz zur Mustertolerierung

Dieses Kapitel beschreibt die neu entwickelte Systematik für Positionstoleranz zur Mustertolerierung auf Basis der ISO 5458 [16] und deren Entwürfe ISO/DIS 5458 [17] und ISO/FDIS 5458 [20]. Die Definition zur Mustertolerierung und die entsprechenden Defizite von ISO wurden bereits in Kapitel 2.1.4.2 beschrieben. In diesem Kapitel wird eine gesamte Systematik zur Mustertolerierung auf Basis der ISO Symbole und Modifikatoren entwickelt. Ziel ist es, eine vollständige und widerspruchsfreie Systematik zu entwickeln. Dadurch könnten viele unnötige Beispiele aus ISO entfernt werden.

Bild 89 stellt dazu die neue Systematik dar. Diese Struktur wurde bereits in Bild 19 in Kapitel 2.1.4.2 dargestellt. Zum Schluss werden die Kombinationsmöglichkeiten der Verbundtoleranz (Orts-, Richtungs- und Formtoleranz) von Mustertolerierung in Kapitel 8.2.3 dargestellt.

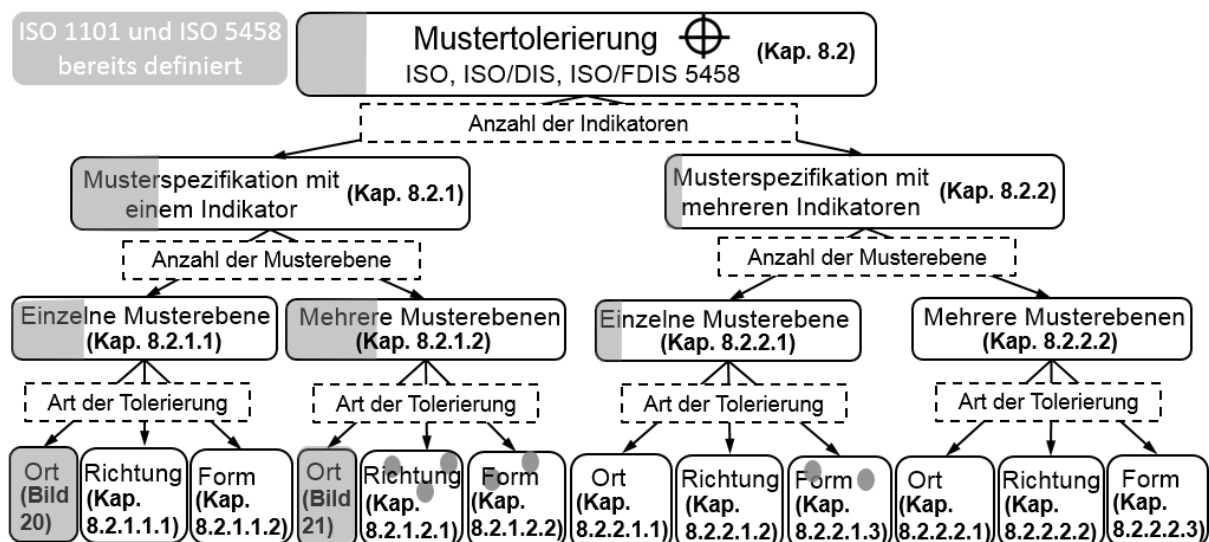


Bild 89 Gesamte Systematik der Positionstoleranz zur Mustertolerierung

8.2.1 Musterspezifikation mit einem Indikator

Die Definition der Musterspezifikation mit einem Indikator wurde in Kapitel 2.1.4.2 beschrieben. Je nach Anzahl der Musterebenen kann diese Musterspezifikation in einzelne (Kapitel 8.2.1.1) oder mehrere Musterebenen (Kapitel 8.2.1.2) unterteilt werden.

8.2.1.1 Einzelne Musterebenen bei einer Musterspezifikation mit einem Indikator

Die Definition einer einzelnen Musterebene bei einer Musterspezifikation mit einem Indikator wurde in Kapitel 2.1.4.2 beschrieben. Je nach Toleranzart kann in Orts-, Richtungs- und Formtoleranz unterteilt werden. Die Ortstoleranz wurde bereits in Bild 20 beschrieben. Die Bedeutung des jeweiligen Modifikators wurde in Tabelle 2 beschrieben. Zusätzlich wird die bildliche Darstellung der Modifikatoren in Tabelle 8 gezeigt, um die neu entwickelte Systematik zu verstehen.





Modifikator	Bildliche Darstellung	Art der Linie
CZ		Dünne durchgezogene Linie
SZ		Strichlinie
CZR		Punktlinie
SIM		Dicke durchgezogene Linie

Tabelle 8 Übersicht der bildlichen Darstellung der Modifikatoren in der neuen Systematik

8.2.1.1.1 Richtungstolerierung der einzelnen Musterebenen

Dieser Abschnitt beschreibt die Richtungstolerierung der Musterspezifikation mit einer einzelnen Musterebene. Für diese Richtungstolerierung darf nur CZ oder SZ verwendet werden, da CZR nach seiner Definition nur für die Formtolerierung verwendet werden darf. Jedoch wird diese Information in ISO/FDIS nicht eindeutig beschrieben. In ISO fehlt eine grundsätzliche Analyse für die Anwendung der jeweiligen Modifikatoren bei jeweiliger Toleranzart. Die vorliegende Arbeit bietet dazu eine logisch aufeinander aufgebaute Systematik mit ausführlicher Analyse an.

Bild 90 zeigt die neu entwickelte Systematik für die Richtungstolerierung der Mustertolerierung mit einer einzelnen Musterebene. Je nach freier Bewegungsrichtung der Toleranzzone kann in drei Fälle unterteilt werden: horizontal, vertikal und alle Richtungen. Bild 90a zeigt die horizontale Bewegungsrichtung der Toleranzzonen (horizontaler Pfeil), da „><“ hinter der Bezugsebene B gekennzeichnet ist. CZ wird als Modifikator für die Richtungstolerierung des Musters verwendet. Das bedeutet, dass die vier Abstände zwischen den vier Achsen als TED betrachtet werden. Das Rechteck mit durchgezogenen Linien

symbolisiert die vier unveränderlichen Abstände. Das Rechteck kann horizontal bewegt werden. Der Toleranzindikator kann ebenfalls mit SZ beschrieben werden (Bild 90b). Das bedeutet, dass die Abstände zwischen den vier Achsen veränderlich sind. Das Rechteck mit Strichlinien symbolisiert die vier veränderlichen Abstände. Eine reale Form der Abstände ist ein Trapez. Das Rechteck kann nur horizontal bewegt werden.

Bild 90c-d zeigen das Bauteil mit vertikaler Bewegungsrichtung der Toleranzzonen. Analog zu Bild 90a-b werden die TGE ebenfalls jeweils mit CZ und SZ analysiert. Die zwei Rechtecke können ebenso analog zu Bild 90a-b definiert werden. Das Trapez ist nun um 180° gedreht.

In Bild 90e wird „><“ hinter B und C angegeben, dadurch wird die horizontale und vertikale Richtungseinschränkung gleichzeitig freigegeben. Zusätzlich befinden sich die Toleranzzonen senkrecht zur primären Bezugsebene A (Bild 90f). Der Modifikator CZ beschränkt die Abstände zwischen den vier Achsen. Die Form der Abstände darf sowohl ein Rechteck als auch ein Parallelogramm sein. Das Beispiel kann ebenfalls mit SZ beschrieben werden, die Abstände zwischen den vier Achsen sind veränderlich. Von daher kann die Form der Abstände nicht immer ein Trapez sein, sondern ein Viereck.

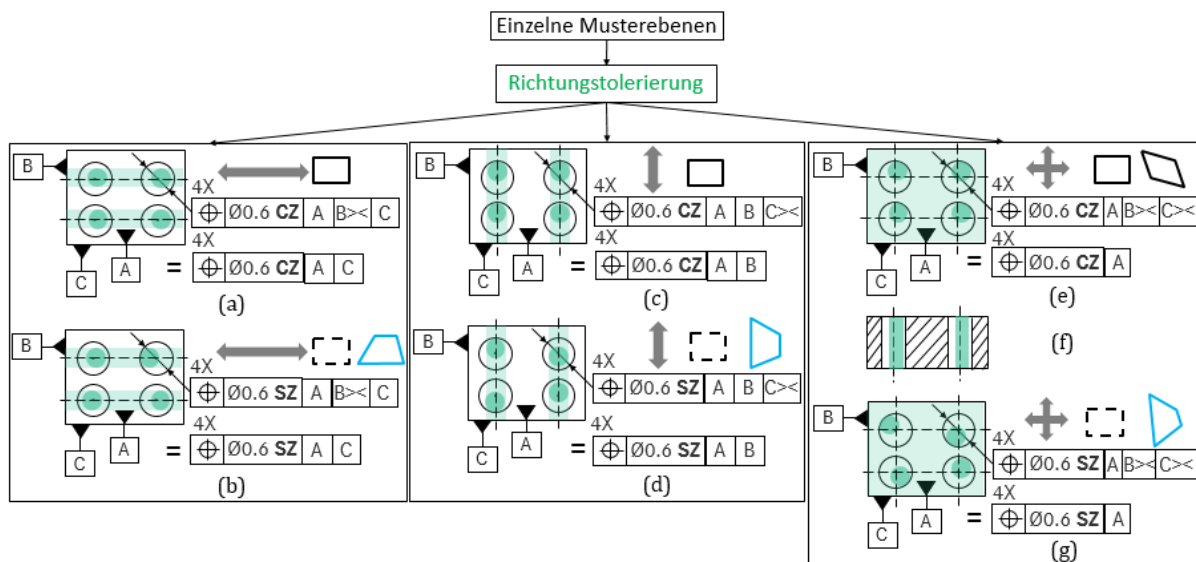


Bild 90 Richtungstolerierung der einzelnen Musterebenen

8.2.1.1.2 Formtolerierung der einzelnen Musterebenen

Dieser Abschnitt beschreibt die Formtolerierung der Musterspezifikation mit einer einzelnen Musterebene. Wegen des oben genannten Grundes darf CZR nur bei Formtolerierungen verwendet werden. Deshalb gibt es theoretisch drei Modifikatoren CZ, CZR und SZ, um die

Formtolerierung des TGE genau zu beschreiben. Bild 91 analysiert die drei Anwendungsfälle mit jeweils konkreten Beispielen. Bild 91a-b stellen den Toleranzindikator mit CZ dar. Die Positionen der vier Toleranzzonen sind toleriert. Die Toleranzzonen dürfen überall bewegt werden. Die Form der Abstände der vier Achsen zueinander kann sowohl ein Rechteck als auch ein Parallelogramm sein. Bild 91c zeigt einen Schnitt des Bauteils. Die Toleranzzonen müssen unter Einwirkung von CZ parallel zueinander liegen.

Bild 91d stellt den Toleranzindikator mit CZR dar. CZR kann nur die Orientierung, nicht aber den Ort der Toleranzzonen einschränken. Die Abstände zwischen den vier Achsen können veränderlich sein. Alle diese Toleranzzonen müssen immer parallel zueinander sein. Das Rechteck mit vier Punktlinien symbolisiert die veränderlichen Abstände. Die Winkel 90° zwischen den vier Punktlinien sind unveränderlich.

Bild 91e zeigt SZ im Toleranzindikator. Das SZ bedeutet, dass alle Toleranzzonen unabhängig voneinander frei bewegt werden dürfen. Dennoch gibt es kein Referenzobjekt, um diese sich frei bewegenden Toleranzzonen einzuschränken. Das ist bedeutungslos bei einer Formtolerierung, da es keinen Sinn macht und kein Anwendungspotential für diese Fälle auf theoretischer und praktischer Ebene gibt. Deswegen soll auf die Formtolerierung, nur bei Verwendung des SZ, verzichtet werden. Diese logische Analyse, welcher Modifikator bei welcher Toleranzart verwendet werden darf, ist in ISO nicht beschrieben.

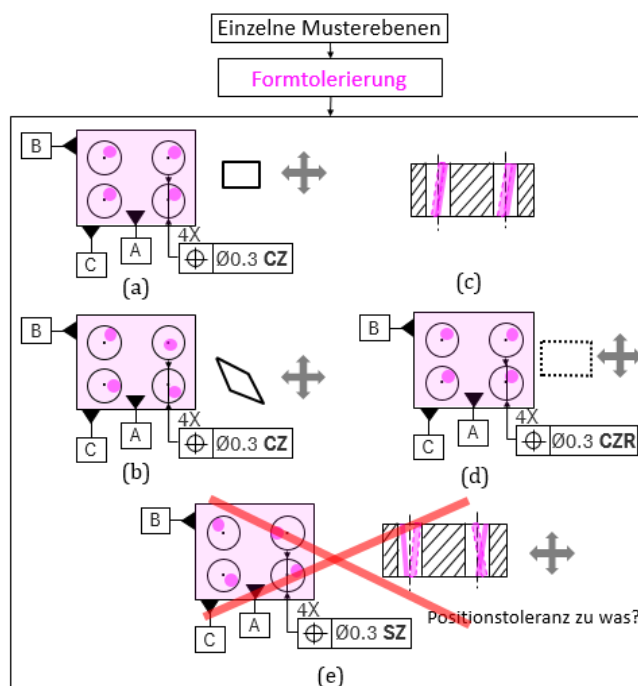


Bild 91 Formtolerierung der einzelnen Musterebenen

8.2.1.2 Mehrere Musterebenen bei einer Musterspezifikation mit einem Indikator

Die Definition von mehreren Musterebenen bei einer Musterspezifikation mit einem Indikator wurde in Kapitel 2.1.4.2 beschrieben. Bei dieser Musterspezifikation sind die GE alle identisch. Jedoch werden die GE nach Bedarf in Gruppen unterteilt. Je nach Toleranzart kann in Orts-, Richtungs- und Formtoleranz unterteilt werden. Die Ortstoleranz wurde bereits in Bild 21 beschrieben. Die ISO Kombinationsmöglichkeiten der Richtungs- und Formtoleranz und deren Defizite wurden bereits in Tabelle 3 und Tabelle 4 vorgestellt. Die dazu neu entwickelte Systematik beseitigt die Definitionslücken und Defizite. Sie bietet eine grundsätzliche Analyse für die Anwendung aller Kombinationsmöglichkeiten der Modifikatoren an und überprüft die Richtigkeit jeder einzelnen Kombination.

8.2.1.2.1 Richtungstolerierung mehrerer Musterebenen

Dieser Abschnitt beschreibt die Richtungstolerierung der Musterspezifikation mit mehreren Musterebenen. Es gibt mathematisch insgesamt vier Kombinationen von CZ und SZ. CZR wird in diesem Abschnitt nicht berücksichtigt, da es nur für die Formtolerierung anwendbar ist. In der Tabelle 3 in Kapitel 2.1.4.2 wurden die vier Kombinationen von CZ und SZ und der Definitionsunterschied zwischen ISO/DIS 5458 und ISO/FDIS 5458 dargestellt. In diesem Kapitel wird eine Analyse zu der jeweiligen konkreten Kombination durchgeführt. Tabelle 9 zeigt die Ergebnisse der Analyse im Vergleich zu DIS und FDIS, welche auf dem Fundament von Bild 92 basieren.

Kombination	ISO/DIS 5458	ISO/FDIS 5458	Analyse
CZ CZ	✓	✓	✓
CZ SZ	✓	✗	✗
SZ CZ	✗	✓	✓
SZ SZ	Nicht definiert	✓	✓ (gilt nur für eine Situation)

Tabelle 9 Kombinationsmöglichkeiten von CZ und SZ bei mehreren Musterebenen mit einem Indikator für Richtungstolerierung

Bild 92 zeigt die dazu neu entwickelte Systematik für die Richtungstolerierung der Musterspezifikation mit mehreren Musterebenen. Analog zum vorangegangenen Kapitel gibt es insgesamt drei Fälle der Richtungstolerierung: die Toleranzzonen können horizontal, vertikal und in alle Richtungen bewegt werden. Bild 92 zeigt ein Beispiel mit zwei Gruppen (A symbolisiert die Gruppe), in jeder Gruppe gibt es zwei GE (B symbolisiert das GE).

Bild 92a stellt die Kombination CZ CZ einer Toleranzzone mit horizontaler Bewegungsrichtung dar, da die Ortseinschränkung basierend auf Bezug B durch „> <“ freigegeben wird. Durch CZ CZ wird die TED zwischen den vier Achsen eingeschränkt. Folglich bildet die Form der Abstände ein Rechteck. Das Rechteck kann horizontal bewegt werden. Die TGE können ebenfalls mit SZ CZ beschrieben werden (Bild 92b). Das Rechteck mit zwei Strichlinien symbolisiert das SZ (veränderlicher Abstand), die durchgezogenen Linien das CZ (TED). SZ wirkt auf die Abstände zwischen den Gruppen A. CZ wirkt auf die Abstände zwischen den TGE - B (innerhalb der Gruppe A). SZ SZ kann in diesem Fall nicht verwendet werden, da durch die Bezugsebene C der Ort und die Orientierung der Toleranzzonen einschränkt wird. Das heißt, die Toleranzzonen dürfen nach der Definition von SZ SZ nicht in alle Richtung bewegt werden. Deswegen kann diese Kombination nicht angewendet werden. Diese ausführliche und strukturierte Analyse fehlt in ISO.

Analog zu Bild 92a-b kann Bild 92c-d ebenfalls analysiert werden.

Bild 92e-h zeigt, dass die Bewegungsrichtung der Toleranzzonen des TGE horizontal und vertikal bewegt werden können. Die Toleranzzonen müssen lediglich senkrecht zur Bezugsebene A liegen (Bild 92f). Analog zu Bild 92a-b können Bild 92e und Bild 92g ebenfalls analysiert werden. Die Kombination SZ SZ kann in diesem Fall verwendet werden, da die Bezugsebenen B und C keine Ortseinschränkung verursachen. Die Form der Abstände zwischen allen vier Achsen dürfen in alle Richtung bewegt werden. Das ist die einzige Situation, bei welcher die SZ SZ Kombination verwendet werden kann. Dies wird allerdings nicht in ISO beschrieben, daher werden durch die Anwendung der Kombination des Modifikators Irreproduzierbarkeit und Missverständnisse verursacht.

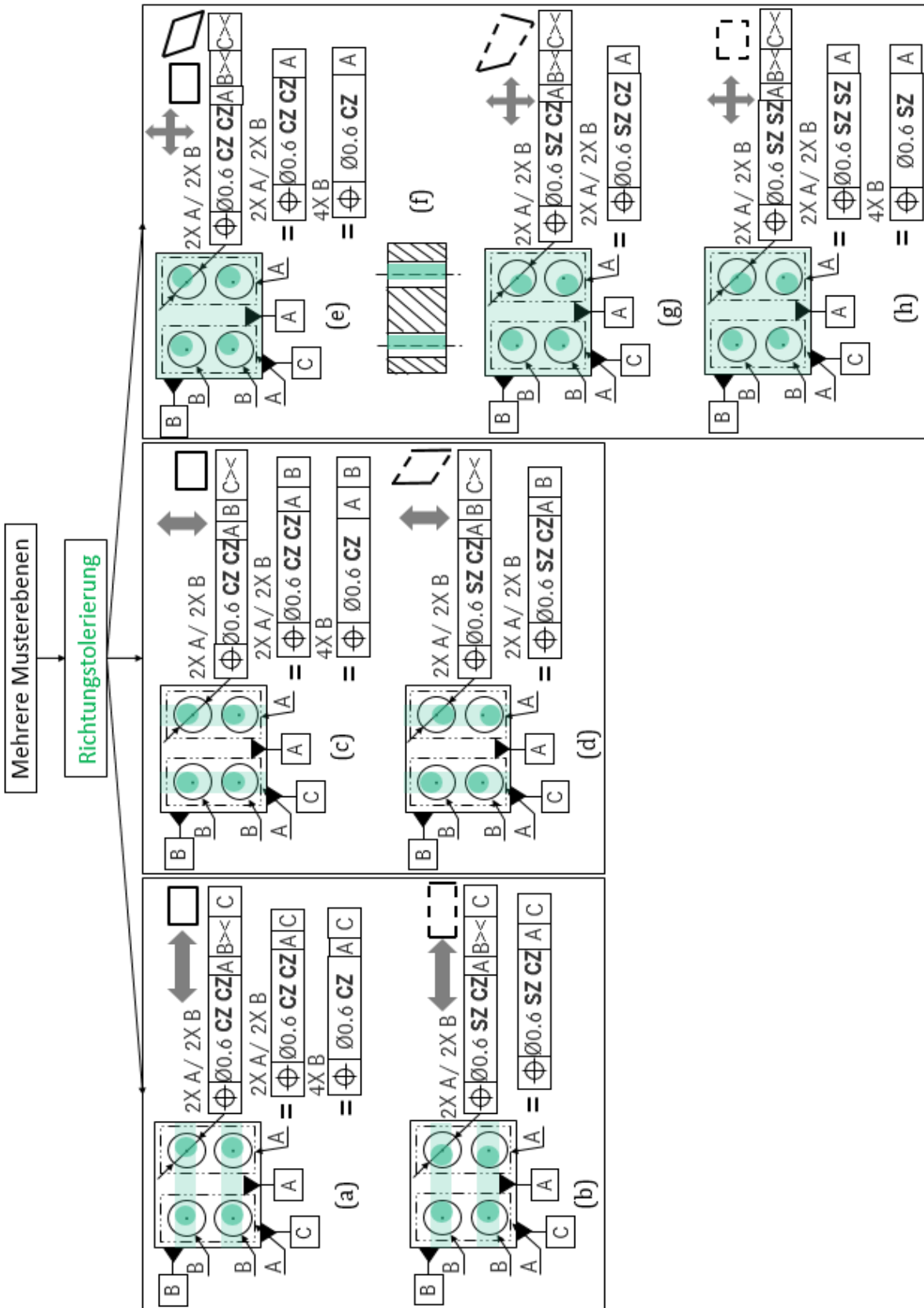


Bild 92 Richtungstolerierung mehrerer Musterebenen

8.2.1.2.2 Formtolerierung mehrerer Musterebenen

Dieser Abschnitt beschreibt die Formtolerierung mehrerer Musterebenen. Aus dem oben genannten Grund darf CZR nun verwendet werden. In Tabelle 4 in Kapitel 2.1.4.2 wurde die Kombinationen von CZR mit CZ und SZ dargestellt. Es gibt insgesamt 9 Kombinationsmöglichkeiten aus den drei Modifikatoren von CZ, SZ und CZR. Tabelle 10, welche von Tabelle 3 und Tabelle 4 zusammengefügt ist, zeigt die 9 konkreten Kombinationen. Es gibt insgesamt 6 Definitionsunterschiede zwischen den FDIS und dieser Arbeit. Die detaillierte Analyse und Begründung wird in Bild 93 mit Beispielen beschrieben.

Kombination	ISO/DIS 5458	ISO/FDIS 5458	Analyse
CZ CZ	✓	✓	✓
SZ SZ	Nicht definiert	✓	X (bedeutungslos)
CZR CZR		X (bedeutungslos)	✓
CZ SZ	✓	X (bedeutungslos)	X (Widerspruch)
SZ CZ	X	✓	✓
CZ CZR	Nicht definiert	X (bedeutungslos)	✓
CZR CZ		✓	✓
SZ CZR		✓	X (Widerspruch)
CZR SZ		X (bedeutungslos)	X (Widerspruch)

Tabelle 10 Kombinationsmöglichkeiten von CZ, SZ und CZR bei mehreren Musterebenen mit einem Indikator für Formtolerierung

Je nach Kombinationsart kann die gesamte Systematik in 4 Gruppen unterteilt werden (Bild 93). Die erste Gruppe besteht aus CZ CZ, SZ SZ und CZR CZR. Die Beurteilung von CZ CZ ist in FDIS und dieser Arbeit identisch, weshalb sie keiner Erläuterung bedürfen. Die Beurteilung von SZ SZ in FDIS ist gegensätzlich im Vergleich zu dieser Arbeit. Bild 93b zeigt ein Beispiel mit SZ SZ im Toleranzindikator. SZ SZ bedeutet, dass die vier Achsen (TGE) ohne Berücksichtigung von Bezügen oder anderen GE frei bewegt werden können. Jedoch gibt es keinen Sinn für diese Kombination, da aus diesem Bauteil kein GE toleriert wird. Die Anwendbarkeit der anderen Kombination CZR CZR (Bild 93c) wird im folgenden überprüft. CZR CZR bedeutet, dass die Orientierungen (theoretisch exakte Winkel) zwischen den vier Achsen nicht verändert werden dürfen. Das Rechteck mit vier Punktlinien symbolisiert die Beziehung zwischen den vier Achsen. Die Winkel zwischen den vier Achsen betragen immer 90° und dürfen nicht geändert werden. Das Rechteck darf überall im Raum bewegt werden.

Diese Definition basiert auf einer theoretischen Ebene und ist korrekt. Jedoch wird CZR CZR in ISO/FDIS 5458 als bedeutungslos definiert. Dies ist eine falsche Beurteilung.

Die zweite Gruppe besteht aus CZ SZ und SZ CZ (Bild 93d,e). Die Beurteilung von CZ SZ ist in FDIS und dieser Arbeit unterschiedlich, da es verschiedene Begründungen gibt, warum CZ SZ nicht funktioniert. Das CZ in CZ SZ bedeutet, dass die zwei Abstände zwischen den zwei Gruppen A unveränderlich sind. Die durchgezogenen Linien im Rechteck symbolisieren das CZ. SZ in CZ SZ kennzeichnet die veränderlichen Abstände zwischen den einzelnen TGE - B innerhalb der Gruppe A. Die Strichlinien im Rechteck symbolisieren das SZ. Unter der Wirkung von SZ dürfen die TGE - B unabhängig voneinander frei bewegt werden. Jedoch müssen, unter Anwendung von CZ, die einzigen TGE - B abhängig voneinander bewegt werden. Dies ist erneut ein Definitionswiderspruch. Die Begründung („bedeutungslos“) wird in FDIS nicht korrekt beschrieben.

Bild 93f-g zeigt die dritte Gruppe aus CZ CZR und CZR CZ. Die Beurteilung von CZR CZ ist identisch, daher wird nur CZ CZR genauer analysiert. Das Rechteck in Bild 93f besteht aus zwei durchgezogenen Linien (CZ) und zwei Punktlinien (CZR). Das heißt, die Orientierung (0° oder 90°) der vier Achsen darf nicht verändert werden, jedoch darf der Abstand zwischen den TGE - B innerhalb der Gruppe A verändert werden. Das Rechteck existiert theoretisch. Diese Kombination CZ CZR wird in FDIS allerdings als bedeutungslos definiert. Dies ist wiederum ein Defizit von ISO FDIS.

Die letzte Gruppe besteht aus SZ CZR und CZR SZ (Bild 93h-i). Die Beurteilung dieser beiden Kombinationen ist in FDIS und dieser Arbeit unterschiedlich. Bild 93h stellt die Kombination SZ CZR dar. Das SZ bedeutet, dass die Abstände zwischen den TGE - B in den zwei Gruppen A veränderlich sind. Das heißt, die vier Achsen dürfen im Raum frei bewegt werden. Jedoch wird die Orientierung der vier Achsen zueinander durch CZR eingeschränkt. Deshalb können die vier Achsen nicht in alle Richtungen bewegt werden. Dies ist definitionswidersprüchlich. Jedoch ist in ISO/FDIS diese Kombination SZ CZR ohne Erläuterung und Beispiele verwendbar. Aus demselben Grund darf CRZ SZ ebenfalls nicht verwendet werden. Deswegen ist die Begründung („bedeutungslos“) in ISO/FDIS falsch definiert.

Folglich wird eine vollständige Systematik zur Analyse der Formtolerierung von mehreren Musterebenen bei Musterspezifikation mit einem Indikator entwickelt.

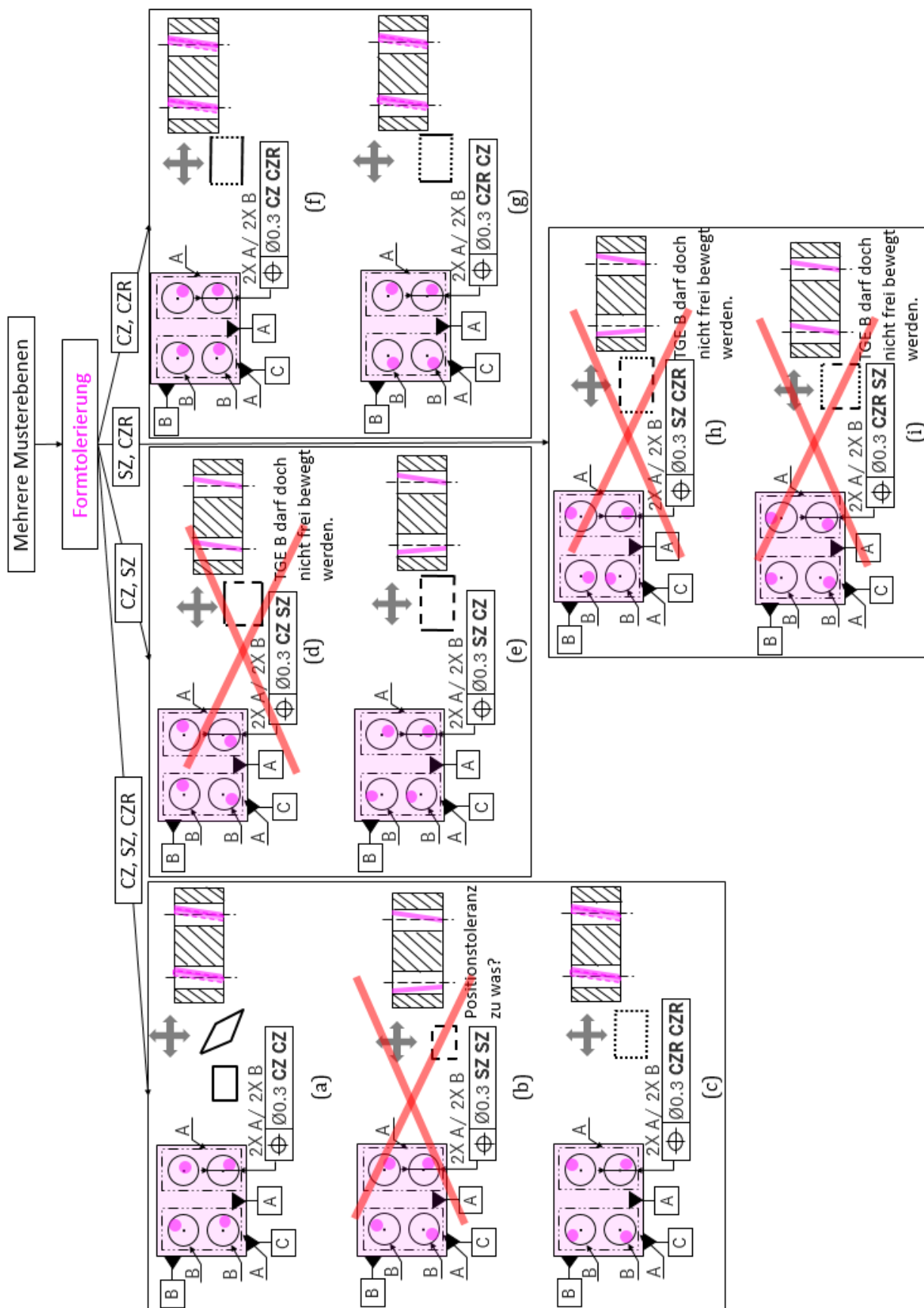


Bild 93 Formtolerierung mehrerer Musterebenen

8.2.2 Musterspezifikation mit mehreren Indikatoren

Die Definition von Musterspezifikation mit mehreren Indikatoren wurde in Kapitel 2.1.4.2 beschrieben. Die GE im Muster sind nicht identisch. Deshalb werden mindestens zwei unterschiedliche Toleranzindikatoren benötigt und das Modifikator SIM muss immer angegeben werden. Je nach Anzahl der Musterebenen kann diese Musterspezifikation in einzelne (Kapitel 8.2.2.1) oder mehrere Musterebenen (Kapitel 8.2.2.2) unterteilt werden.

8.2.2.1 Einzelne Musterebenen bei Musterspezifikation mit mehreren Indikatoren

Die Definition einer einzelnen Musterebene bei Musterspezifikation mit mehreren Indikatoren wurde in Kapitel 2.1.4.2 beschrieben. Je nach Toleranzart kann in Orts-, Richtungs- und Formtoleranz unterteilt werden. Die Kombinationsmöglichkeiten von CZ, SZ, CZR mit SIM für Formtoleranz wurde in Tabelle 5 in Kapitel 2.1.4.2 vorgestellt. Die Analyseergebnisse zu der Richtigkeit der Kombinationstabelle wird in Kapitel 8.2.2.1.3 in Tabelle 11 dargestellt.

8.2.2.1.1 Ortstolerierung einer einzelnen Musterebene

Bild 94 stellt ein Beispiel mit zwei unterschiedlichen Mustern von GE dar: ein Muster besitzt den Durchmesser von 5 mm, das andere 10 mm. Das Modifikator SIM bedeutet, dass dadurch der Ort und die Orientierung der Toleranzzonen der zwei unterschiedlichen Muster eingeschränkt werden. Das Rechteck symbolisiert die Form der Abstände zwischen den vier theoretisch exakten Achsen. Die beiden dicken durchgezogenen Linien symbolisieren die unveränderlichen Abstände zwischen den zwei Mustern (SIM) und die dünnen Linien symbolisieren die TED zwischen den zwei identischen GE innerhalb eines Musters. Diese Schreibweise hat dieselbe Bedeutung, als wenn die zwei SIM nicht angegeben wären. Jedoch widerspricht die ISO Definition, dass SIM bei der Musterspezifikation mit mehreren Indikatoren immer angegeben werden muss. Der Lösungsvorschlag ist, dass die Formulierung von ISO geändert wird.

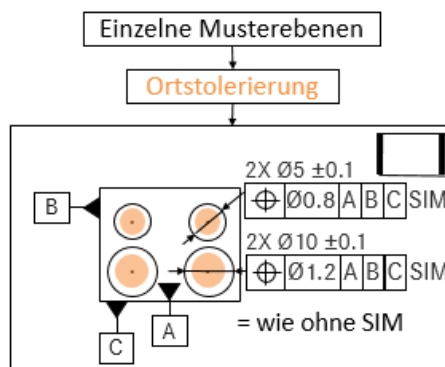


Bild 94 Ortstolerierung einer einzelnen Musterebene für Musterspezifikation mit mehreren Indikatoren

8.2.2.1.2 Richtungstolerierung einer einzelnen Musterebene

Dieser Abschnitt beschreibt die Kombinationsmöglichkeiten zwischen CZ, SZ und SIM für die Richtungstolerierung. CZR darf nur für Formtolerierung verwendet werden, deswegen wird es in diesem Abschnitt nicht berücksichtigt. In ISO/FDIS 5458 darf SIM nur zusammen mit CZ verwendet werden. In FDIS gibt es keine Definition für SIM und SZ. Mit der neu entwickelten Systematik in Bild 95 werden alle Kombinationsmöglichkeiten analysiert, um die Definitionen der FDIS zu vervollständigen.

Bild 95a-d zeigt den ersten Fall, dass sich alle Toleranzzonen horizontal bewegen können. Die Kombination von CZ und SIM funktioniert einwandfrei (Bild 95a). Bild 95b zeigt die Kombination von CZ SIM und SZ SIM. Das Rechteck symbolisiert die Beziehung der Abstände zwischen den vier Achsen. Der Punkt im Rechteck, welcher durch die Strichlinie (SZ) und die dicke durchgezogene Linie (SIM) erzeugt wird, symbolisiert die Achse von der unteren rechten Bohrung. Wenn diese Achse nach der Definition von SZ frei bewegt wird, verletzt dies die Randbedingung von SIM, da seine Länge dadurch verändert wird. Die Modifikatoren SZ und SIM sind zueinander widersprüchlich. Daher können SIM und SZ nicht zusammen verwendet werden. Dieses Merkmal zwischen SIM und SZ wird in ISO nicht beschrieben. Die gleiche Begründung erklärt ebenfalls Bild 95c und Bild 95d.

Daraus ergibt sich eine Regel, welche auf theoretischer Ebene analysiert und bewiesen wird: Aufgrund der Definitionswidersprüche können die Modifikatoren SIM und SZ nicht zusammen verwendet werden. Analog zum ersten Fall können aus demselben Grund der zweite und dritte Fall in Bild 95e-i erklärt werden.

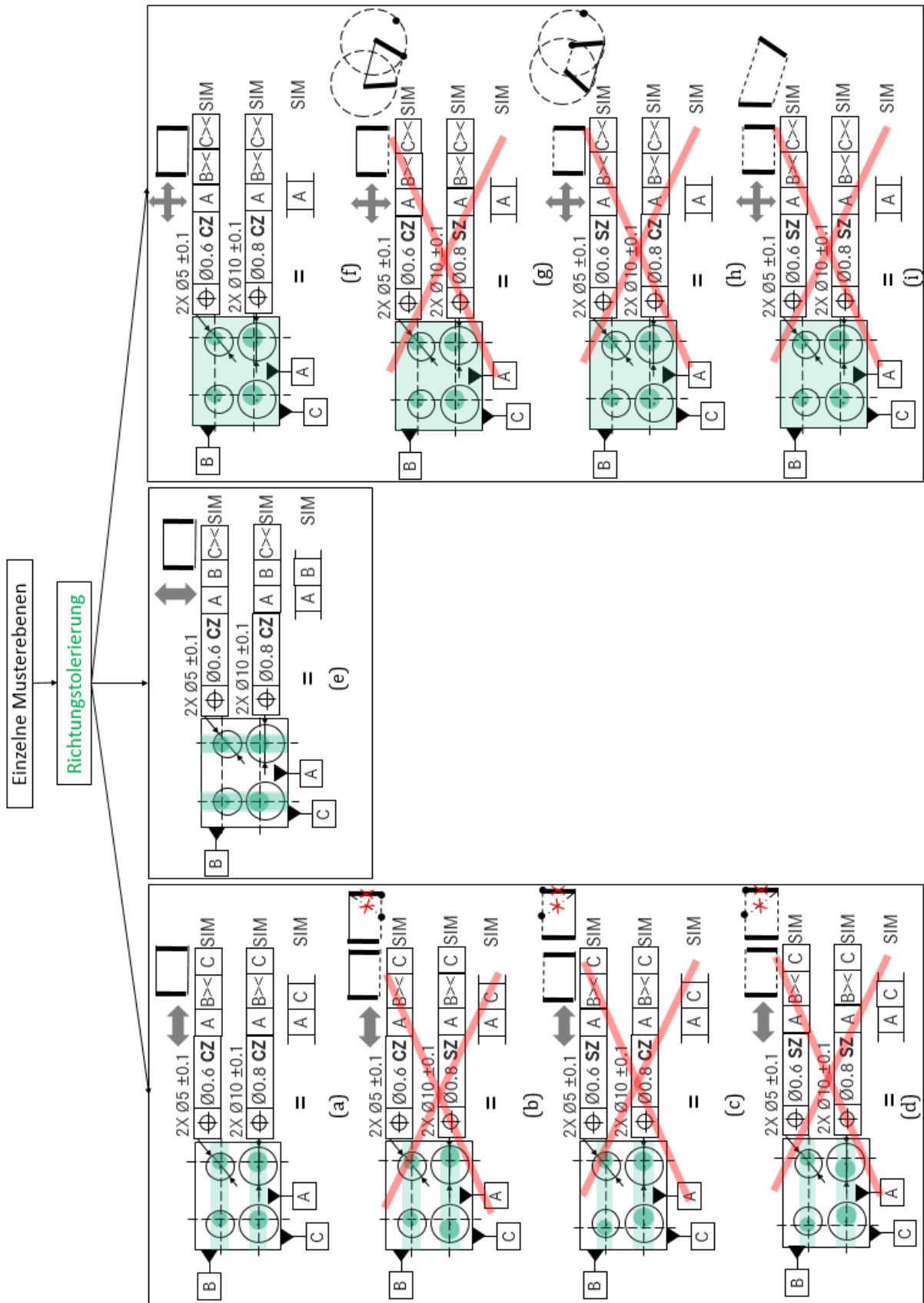


Bild 95 Richtungstolerierung der einzelnen Musterebenen für eine Musterspezifikation mit mehreren Indikatoren

8.2.2.1.3 Formtolerierung einer einzelnen Musterebene

Tabelle 5 in Kapitel 2.1.4.2 hat die kompletten 9 Kombinationsmöglichkeiten von CZ, SZ, CZR mit SIM gezeigt. Tabelle 11 zeigt zusätzlich die Analyseergebnisse der 9 Kombinationen. Wie bereits in Kapitel 8.2.2.1.2 beschrieben wurde, ist die Kombination SIM und SZ definitionswidersprüchlich. Folglich können die 5 Kombinationen (siehe Bild 96c-g) weggelassen werden. In ISO/FDIS 5458 wird bereits definiert, dass SIM und CZR nicht zusammen angegeben werden dürfen. Jedoch wird es nicht begründet. Bild 96a und Bild 96h-i stellen die entsprechenden drei Kombinationen von CZ, CZR und SIM dar, um die Richtigkeit der ISO Definition zu überprüfen.

Kombination	ISO/DIS 5458	ISO/FDIS 5458	Analyse	
CZ, SIM CZ, SIM	✓	✓	✓	
SZ, SIM SZ, SIM	Nicht definiert	Nicht definiert	✗ (siehe Kap. 8.2.2.1.2)	
CZR, SIM CZR, SIM		X (keine Erläuterung)	✗ (Definitionswiderspruch)	
CZ, SIM SZ, SIM		Nicht definiert	Nicht definiert	✗ (siehe Kap. 8.2.2.1.2)
SZ, SIM CZ, SIM				✗ (siehe Kap. 8.2.2.1.2)
CZ, SIM CZR, SIM				✗ (Definitionswiderspruch)
CZR, SIM CZ, SIM				✗ (Definitionswiderspruch)
SZ, SIM CZR, SIM				✗ (siehe Kap. 8.2.2.1.2)
CZR, SIM SZ, SIM				✗ (siehe Kap. 8.2.2.1.2)

Tabelle 11 Kombinationstabelle für die Formtolerierung der Musterspezifikation mit mehreren Musterebenen

Je nach Kombinationsart kann die Formtolerierung in 4 Gruppen unterteilt werden. Bild 96 zeigt diese Systematik. Bild 96a stellt ein Beispiel mit Kombination CZR, CZR (SIM) dar. Das Rechteck mit zwei durchgezogenen Linien (SIM) und zwei Punktlinien (CZR) symbolisiert die Beziehung zwischen den vier Achsen. Wenn die vier Achsen nach CZR vertikal bewegt werden, verletzt dies die Randbedingung von SIM. Deswegen ist diese Kombination SIM mit CZR definitionswidersprüchlich. Aus demselben Grund können die Kombinationen CZ, CZR (SIM) (Bild 96h) und CZR, CZ (SIM) (Bild 96i) ebenfalls erklärt werden.

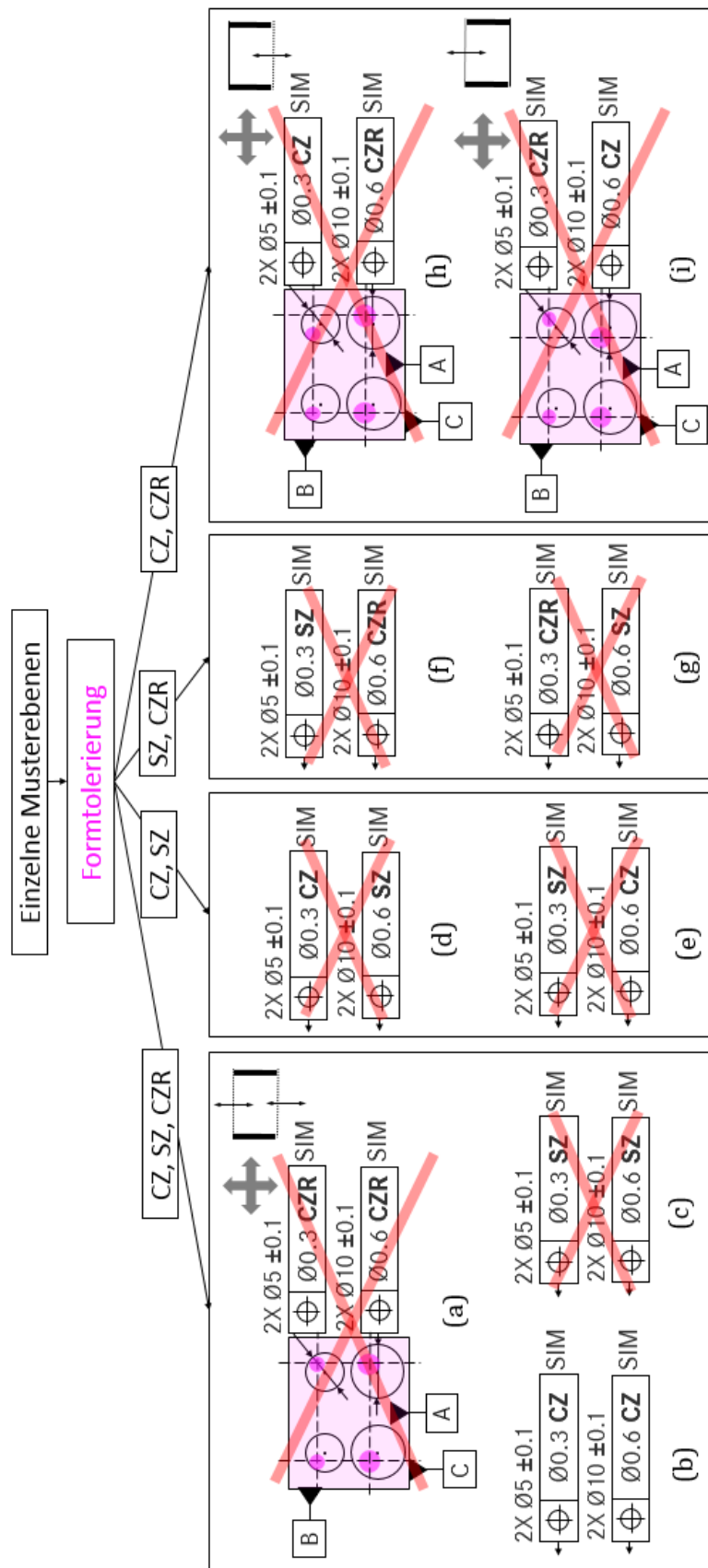


Bild 96 Formtolerierung der einzelnen Musterebenen für eine Musterspezifikation mit mehreren Indikatoren

8.2.2.2 Mehrere Musterebenen bei einer Musterspezifikation mit mehreren Indikatoren

Diese Musterspezifikation bedeutet, dass die Anzahl der Musterebenen mehr als eins ist und die GE nicht alle identisch sind. Um die GE zu tolerieren, werden mehr als zwei Indikatoren benötigt. Diese Art von Musterspezifikation wird nicht in ISO/FDIS 5458 erwähnt. Das ist eine Definitionslücke. Dieses Kapitel beschreibt eine neu entwickelte Systematik, welche die ISO Sprachensymbole benutzt, um die Definitionslücke zu füllen. Die detaillierte Beschreibung befindet sich in den folgenden Unterkapiteln.

8.2.2.2.1 Ortstolerierung mehrerer Musterebenen

Bild 97 stellt ein Beispiel der Ortstolerierung dar. Das vollständige Bezugssystem schränkt den Ort und die Richtung der 8 TGE in den jeweiligen Gruppen A und C ein. Der Modifikator SIM definiert den unveränderlichen Abstand und die Orientierung zwischen den Gruppen A und C. Die Skizze symbolisiert die Beziehung der Abstände zwischen den 8 TGE. Die Musterspezifikation hat dieselbe Bedeutung, wenn das SIM entfällt und es keine Gruppen gibt, da der Ort der TGE komplett durch das vollständige Bezugssystem eingeschränkt wird.

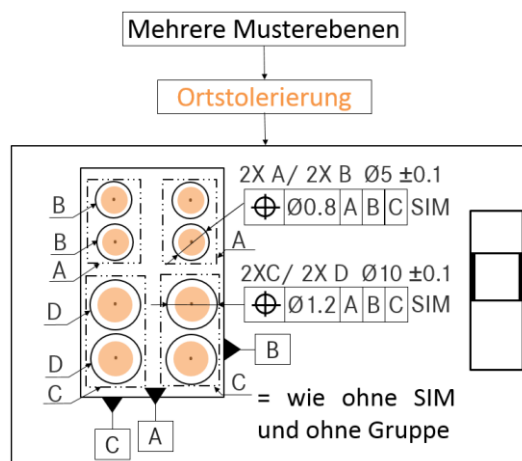


Bild 97 Ortstolerierung von mehreren Musterebenen

8.2.2.2.2 Richtungstolerierung mehrerer Musterebenen

In diesem Abschnitt wird das gleiche Bauteil von Bild 97 weiterverwendet, wobei die Musterspezifikation nun eine Richtungstolerierung ist. Es gibt insgesamt 5 Kombinationen zwischen CZ und SZ mit SIM. In Tabelle 12 sind alle Kombinationen dargestellt. In ISO/FDIS 5458 fehlt die komplette Definition dieser Art von Musterspezifikation, deshalb gibt

es keine Definitionen für die 5 Kombinationen. Die Analyse und die Definitionen werden in Bild 98 beschrieben.

Kombination	ISO/FDIS 5458	Analyse
CZ CZ, SIM CZ CZ, SIM	Nicht definiert	✓
CZ CZ, SIM SZ CZ, SIM		✗ (Definitionswiderspruch)
SZ CZ, SIM CZ CZ, SIM		
SZ CZ, SIM SZ CZ, SIM		
SZ SZ, SIM SZ SZ, SIM		

Tabelle 12 Kombinationsmöglichkeiten der Richtungstolerierung für eine Musterspezifikation mit mehreren Musterebenen bei mehreren Indikatoren

Bild 98 zeigt die Richtungstolerierung der GE mit allen Kombinationsmöglichkeiten von CZ und SZ zusammen mit SIM. Je nach freier Richtung der Toleranzzone kann die Systematik zwischen „horizontal, vertikal und in alle Richtungen verschiebbar“ unterschieden werden.

Bild 98a-e zeigt die erste Situation. Bild 98a stellt die Kombination CZ CZ (SIM) für die beiden Toleranzindikatoren dar. Die Skizze symbolisiert die Beziehung der Abstände zwischen den 8 TGE. Die Länge und die Richtung der Abstände ist unveränderbar. Die Skizze kann horizontal frei bewegt werden. Diese Definition ist funktionsfähig. Der Toleranzindikator hat dieselbe Bedeutung, wenn keine Gruppe innerhalb eines Musters existiert und mit nur einem CZ definiert wird. Bild 98b zeigt die Kombination CZ CZ (SIM) für einen Toleranzindikator und SZ CZ (SIM) für den zweiten Toleranzindikator. Die Strichlinien (SZ) symbolisieren die veränderlichen Abstände zwischen den entsprechenden GE. Wenn der Eckpunkt (die Achse) nach links bewegt wird, dann werden die Randbedingungen von SIM und CZ verletzt. Das ist definitionswidersprüchlich. Deswegen ist die Kombination von SZ und SIM für diese Art von Musterspezifikation nicht anwendbar. Aus demselben Grund können die folgenden Kombinationen in Bild 98c-e ebenfalls nicht funktionieren.

Für die vertikalen (Bild 98f) und in alle Richtungen (Bild 98g) frei beweglichen Toleranzzonen kann die gleiche Theorie angewendet werden.

Innerhalb der 5 Kombinationsmöglichkeiten gilt nur die einzige Kombination CZ CZ und SIM.



Bild 98 Richtungstolerierung von mehreren Musterebenen mit mehreren Indikatoren

8.2.2.2.3 Formtolerierung mehrerer Musterebenen

Dieser Abschnitt beschreibt die letzte Toleranzart - Formtolerierung dieser Musterspezifikation. Der Modifikator CZR darf bei Formtolerierung verwendet werden, deshalb gibt es nun die Kombinationen zwischen CZ, SZ und CZR zusammen mit SIM (Tabelle 13). Das SZ und CZR dürfen jeweils nicht mit SIM gleichzeitig verwendet werden, dies wurde bereits in Kapitel 8.2.2.1.3 und 8.2.2.2.2 beschrieben. Somit bleibt nur die Kombination zwischen CZ und SIM übrig. Bild 99 zeigt dazu die neu entwickelte Systematik.

Kombination	ISO/FDIS 5458	Analyse
CZ CZ, SIM CZ CZ, SIM	Nicht definiert	✓
SZ SZ, SIM SZ SZ, SIM		✗ (siehe Kap. 8.2.2.2.2)
CZR CZR, SIM CZR CZR, SIM		✗ (siehe Kap. 8.2.2.1.3)
CZ & SZ, SIM		✗ (siehe Kap. 8.2.2.2.2)
SZ & CZR, SIM		✗ (siehe Kap. 8.2.2.1.3)
CZ & CZR, SIM		✗ (siehe Kap. 8.2.2.1.3)

Tabelle 13 Kombinationsmöglichkeiten der Formtolerierung für eine Musterspezifikation mit mehreren Musterebenen bei mehreren Indikatoren

Je nach der Kombinationsart kann die Systematik in vier Gruppen unterteilt werden. Jedoch gibt es nur eine funktionsbasierte Kombination, CZ CZ (SIM), um die Formtolerierung der Musterspezifikation zu tolerieren. Bild 99a zeigt dieses Beispiel. Die Skizze stellt die Beziehung der Abstände zwischen den 8 TGE dar. Alle Abstände sind TED. Die 8 zusammen gebundenen TGE können in alle Raumrichtungen bewegt werden und ihre Positionen sind zueinander gegenseitig referenziert. Bild 99b zeigt die Seitenansicht des Bauteils, aufgrund der Einschränkung von CZ und SIM sollen die 8 Achsen (TGE) zueinander parallel sein.

Bild 99c-g zeigt, dass die restlichen Kombinationsmöglichkeiten aufgrund des Definitionswiderspruchs nicht funktionieren.

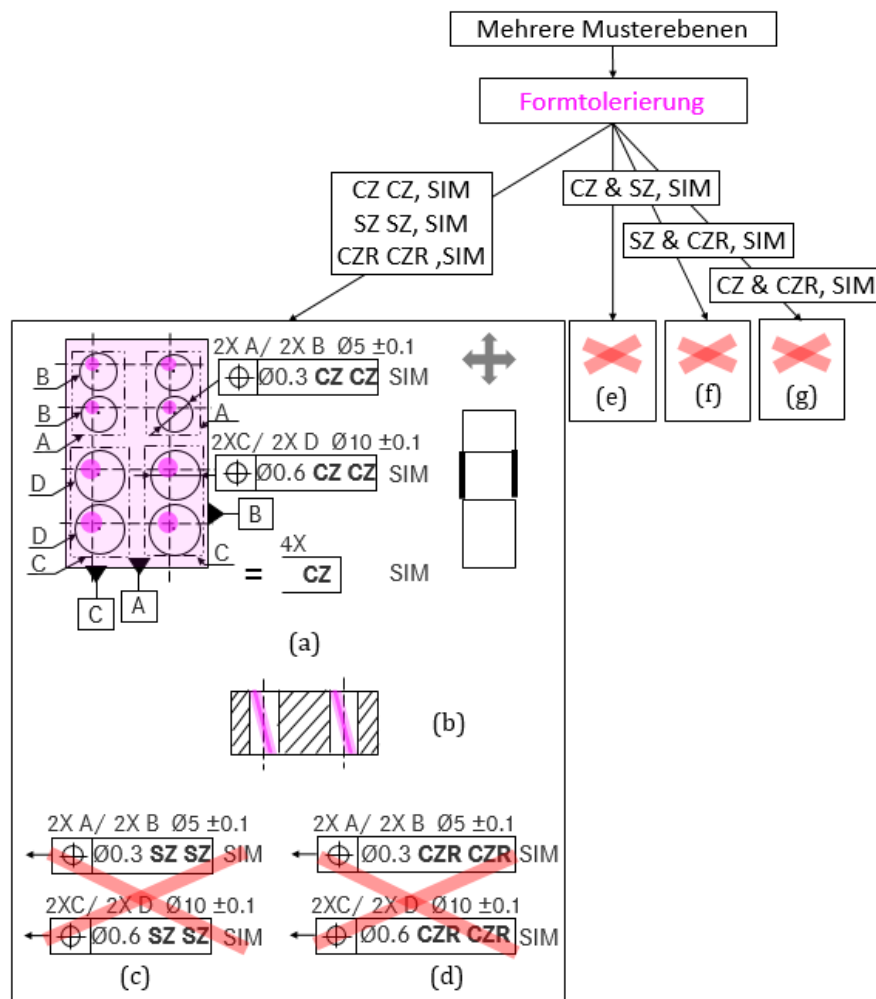


Bild 99 Formtolerierung mehrerer Musterebenen

8.2.3 Kombinationsmöglichkeiten der Verbundtoleranz einer Musterspezifikation

In den vorangegangenen Kapiteln wurde die detaillierte Analyse für eine Musterspezifikation mit einem und mehreren Indikatoren bei einzelnen und mehreren Musterebenen jeweils mit der Orts-, Richtungs- und Formtolerierung durchgeführt. In diesem Kapitel wird eine gesamte Kombinationstabelle von Verbundtoleranz, welche aus den Kombinationen von Orts-, Richtungs- und Formtoleranz besteht, erstellt. Je nach Anzahl des Toleranzindikators kann dieses Kapitel in zwei Unterkapitel unterteilt werden: Kombinationsmöglichkeiten für die Musterspezifikation mit einem und mit mehreren Indikatoren.

8.2.3.1 Kombinationsmöglichkeiten der Verbundtoleranz einer Musterspezifikation mit einem Indikator

Bild 100 stellt die gesamte Kombinationstabelle der Verbundtoleranz von Orts-, Richtungs- und Formtolerierung für eine Musterspezifikation mit einem Indikator dar. Diese Systematik kann in eine Musterspezifikation mit einer einzelnen und mit mehreren Musterebenen eingeteilt werden. Die Zahl in der Systematik symbolisiert die Anzahl der Kombinationsmöglichkeit bei einer bestimmten Toleranzart, welche in den vorangegangenen Kapiteln 8.2.1 beschrieben ist. Es gibt insgesamt vier Arten von Verbundtoleranz: I. Ortstoleranz mit zusätzlicher Richtungstoleranz; II. Ortstoleranz mit zusätzlicher Formtoleranz; III. Richtungstoleranz mit zusätzlicher Formtoleranz und IV. Ortstoleranz, Richtungstoleranz mit zusätzlicher Formtoleranz. Bei einer einzelnen Musterebene besitzt die Verbundtoleranz I eine Möglichkeit von Ortstoleranz und 6 Möglichkeiten bei der Richtungstoleranz. Diese konkreten Zahlen stammen aus dem Kapitel 8.2.1. Daraus ergibt sich die Gesamtanzahl von Kombinationsmöglichkeiten von 6. Analog zu diesem Denkmodell wird die Verbundtoleranz II - IV ebenfalls analysiert. Entsprechend der Musterspezifikation mit einer einzelnen Musterebene kann die Musterspezifikation mit mehreren Musterebenen ebenfalls analysiert werden.

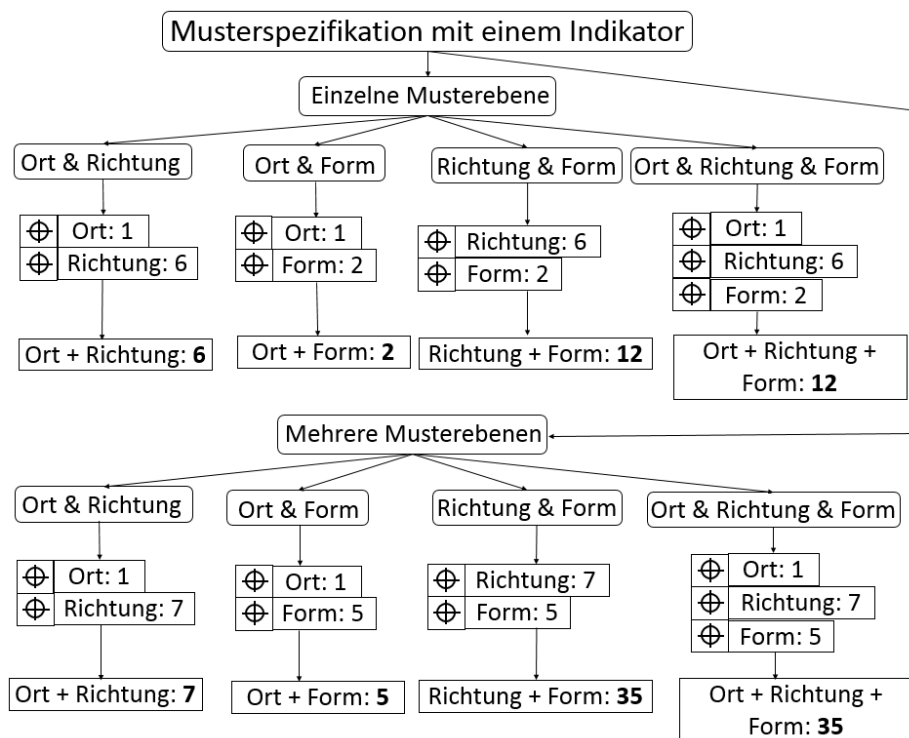


Bild 100 Kombinationsmöglichkeiten der Verbundtoleranz einer Musterspezifikation mit einem Indikator

8.2.3.2 Kombinationsmöglichkeiten der Verbundtoleranz von Musterspezifikation mit mehreren Indikatoren

Analog zu Bild 100 wird in Bild 101 die gleiche Analyse­methode für die Kombinations­möglichkeiten der Verbundtoleranz der Musterspezifikation mit mehreren Indikatoren verwendet.

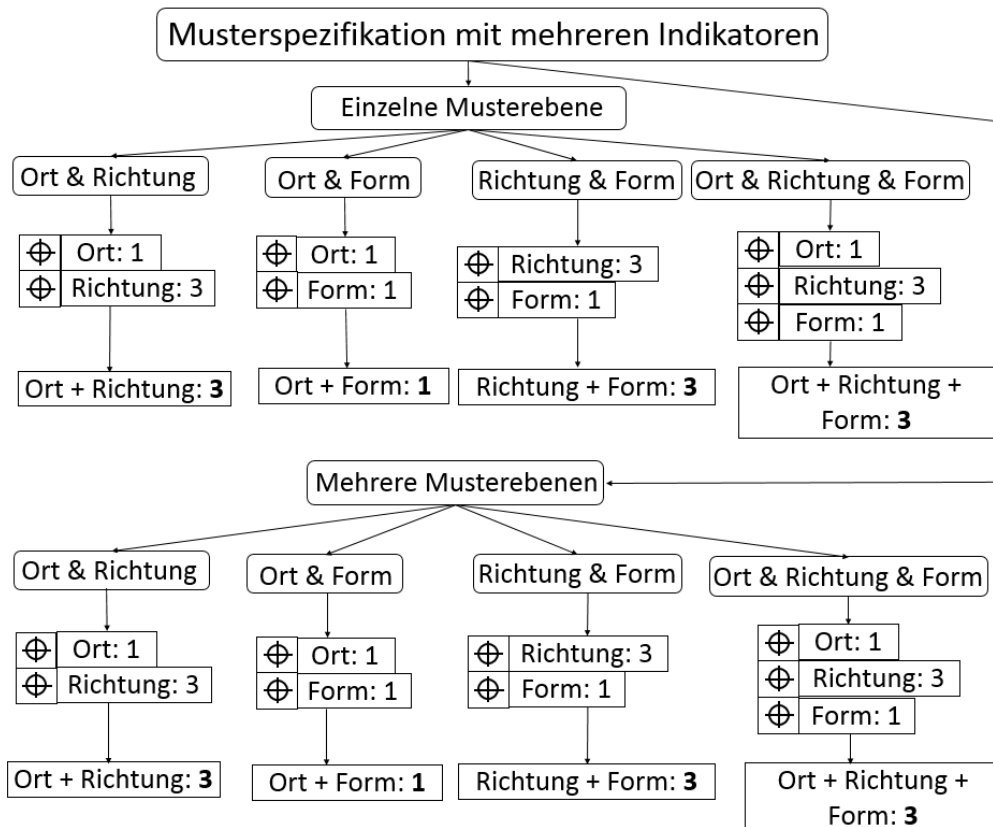


Bild 101 Kombinationsmöglichkeiten der Verbundtoleranz einer Musterspezifikation mit mehreren Indikatoren

9 Praxisbeispiele

Die in dieser Arbeit neu entwickelten Systematiken sind auf einer theoretischen Ebene erstellt, mit dem Ziel, dass die ISO GPS Normen ergänzt und erweitert werden. Als Ergebnis wurde eine vollständige Systematik für alle GE entwickelt. Vor diesem Hintergrund ergeben sich manchmal Systematiken, die nur auf einer theoretischen Ebene existieren und kaum Bedeutung in der Praxis haben. Daher ergibt sich die Notwendigkeit, die Systematik nach *praxisorientiert* und *theoretisch-existierend* zu unterscheiden. Diese zwei Gruppen werden anhand der beiden GPS-Systematiken definiert: Bezüge und Tolerierung. Die Aufteilung der Systematik ist aufgrund der Häufigkeit und anhand der Anwendbarkeit in der Praxis erstellt. Die Aufteilung weicht von den Erfahrungen der Ingenieure und Messtechniker in unterschiedlichen Gebieten (z.B. klassischer Maschinenbau, Luftfahrtindustrie) ab. Die in dieser Arbeit dargestellte Aufteilung basiert auf den Erfahrungen der Automobilindustrie.

Klärung der Praxis-Anwendbarkeit der Systematiken von Bezügen:

Die Kapitel 4-6 haben bereits die neu entwickelte Systematik zur Ergänzung und Erweiterung der ISO 5459 detailliert beschrieben. Die konkrete Aufteilung der Systematik wird im Anhang gezeigt. Die grüne durchgezogene Linie symbolisiert die praxisorientierte Theorie und die blaue Strichlinie die theoretisch-existierende Theorie. Die bereits in ISO definierten Theorien werden hierbei nicht betrachtet. Die Bilder 115 bis 135 in Kapitel 12 stellen die detaillierte Aufteilung der Systematik zu den Bezügen dar.

Klärung der Praxis-Anwendbarkeit der Systematiken von Tolerierungen:

In Kapitel 7-8 wurde bereits die neu entwickelte Systematik zur Ergänzung und Erweiterung der ISO 1101, ISO 1660 und ISO/FDIS 5458 detailliert beschrieben. Die Bilder 136 bis 160 in Kapitel 12 stellen die detaillierte Aufteilung der Systematik zu den Tolerierungen dar.

In dieser Arbeit gibt es zahlreiche neu entwickelte Theorien, die alle auf einer theoretischen Ebene entwickelt wurden. Vorliegend werden einige Theorien ausgewählt, welche für die Automobilindustrie von besonderer Bedeutung sind, um ihre Anwendbarkeit in der Praxis zu demonstrieren. Diese Theorien werden für konkrete Bauteile verwendet, z.B. mit der Messsoftware GOM-Inspect [253, 254], welche die am häufigsten benutzte Messsoftware in der Automobilindustrie ist. Die konkreten Praxisbeispiele mit ausführlicher Beschreibung der Vorgehensweise und die entsprechenden Messergebnisse sind in Kapitel 9.1, Praxisbeispiele für Bezüge, und in Kapitel 9.2, Praxisbeispiele für Tolerierungen, beschrieben.

9.1 Praxisbeispiele für Bezüge

In diesem Kapitel werden die neu entwickelten Bezugstheorien mit verschiedenen Praxisbeispielen aus den folgenden drei Bereichen dargestellt, um die Anwendbarkeit dieser ausgewählten neu entwickelten Bezugstheorien in der Praxis zu zeigen. Die drei Bereiche sind: Kapitel 9.1.1 Aufbaumethode des Bezugssystems für ein komplexes Bauteil; Kapitel 9.1.2 Punkt auf einer Fläche als Bezug und Kapitel 9.1.3 Rundloch, Langloch und Vierkantloch als Bezug.

9.1.1 Praxisbeispiele für die Aufbaumethode des Bezugssystems für ein komplexes Bauteil

In Kapitel 6 wurde die folgende Theorie beschrieben: wenn alle 6 Freiheitsgrade des Bauteils beschränkt sind, sind die Messergebnisse des Bauteils unabhängig vom Bezugssystem. Der Grund liegt darin, dass das Bauteil im Raum fixiert ist und dies genügt für die Messung durch das Messgerät. Die Bilder 102 bis 104 zeigen die entsprechenden Praxisbeispiele.

In Bild 102 ist ein Würfel mit zwei parallel versetzten Ebenen dargestellt. Bild 102a zeigt die Bezugsstellen und die Abweichung der Oberfläche nach den vier Bezugssystemen. Die Messergebnisse der Oberfläche sind identisch. Um die Richtigkeit der Theorie zu überprüfen, wird die Position eines Lochs des Würfels gemessen. Bild 102b zeigt das vollständige Bezugssystem gemäß der RPS- /ASME-Methode. Das Bezugssystem besteht aus den drei netzparallelen Bezugsebenen. Die Abweichungen des Kreises betragen in X- und Z- Richtung $-0,52$ mm und $+0,12$ mm. Es wird folglich kein Bezugssystem nach ISO-Methode aufgebaut, da theoretisch keine virtuelle mittlere Ebene von den drei Bezugsstellen aus den zwei parallel versetzten Ebenen gebildet werden kann. Bild 102c zeigt ein Bezugssystem, welches aus der schrägen primären Bezugsebene AD und zwei senkrecht zueinander stehenden Ebenen besteht. Das Messergebnis des Kreises ist identisch wie bei der Verwendung der RPS- und ASME-Methode. Bild 102d zeigt die FNV-Methode und das Messergebnis ist gleich wie bei den anderen Methoden. Diese Untersuchung zeigt, dass die Messergebnisse unabhängig von der Aufbaumethode des Bezugssystems sind. Jedoch ist das Denkmodell von den jeweiligen Methoden wesentlich unterschiedlich und nur bei der FNV-Methode werden die Funktionen des Bauteils berücksichtigt.

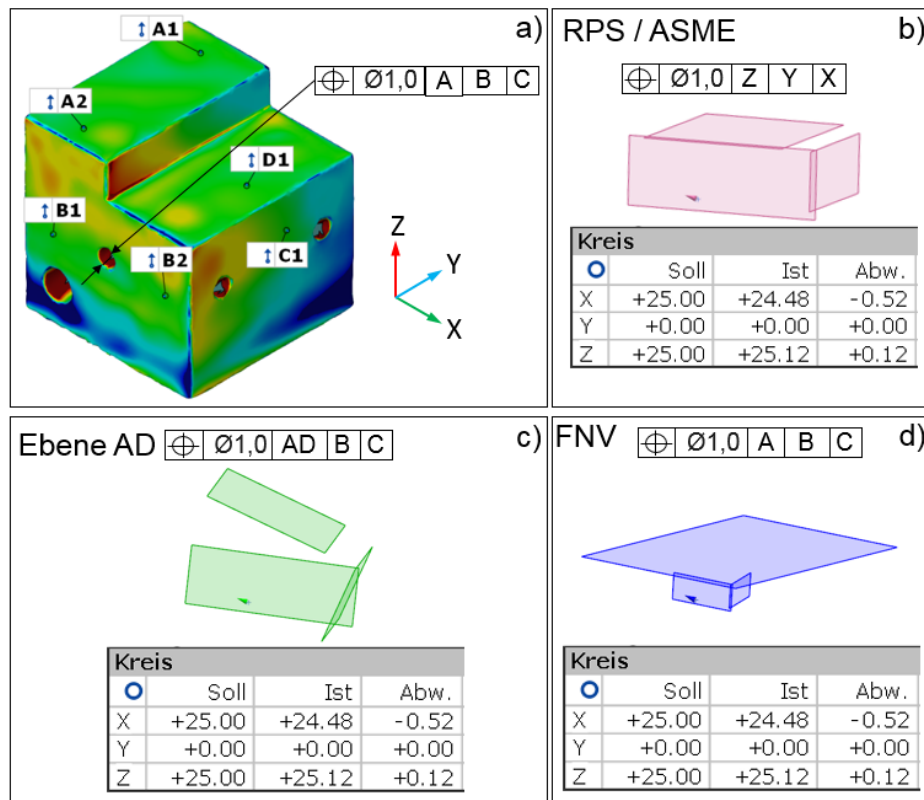


Bild 102 Messergebnisse des Kreises vom Würfel bei Verwendung der vier Bezugssysteme: a) Messergebnisse der Oberfläche des Würfels; b) Messergebnis des Kreises nach der RPS/ASME-Methode; c) nach der Ebene AD; d) nach der FNV-Methode

Bild 103 zeigt einen Kotflügel. Die Messergebnisse eines Kreises des Kotflügels sind identisch bei allen vier vollständigen Bezugssystemen. Das jeweilige Bezugssystem beschränkt alle 6 Freiheitsgrade des Kotflügels, daher sind die Messergebnisse identisch. Die Anwendbarkeit der neu entwickelten Theorien wird dadurch nochmals verdeutlicht.

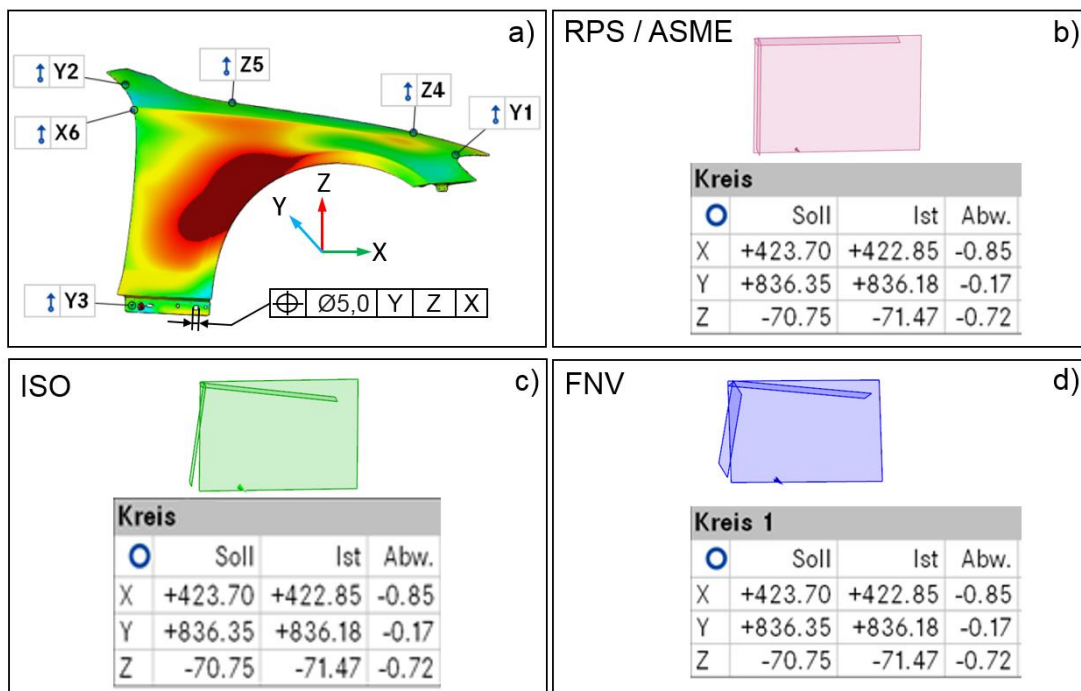


Bild 103 Messergebnisse des Kreises eines Kotflügels nach unterschiedlichen Bezugssystemen: a) Messergebnisse der Oberfläche; Messergebnis des Kreises b) nach der RPS-/ASME-Methode; c) nach der ISO-Methode und d) nach der FNV-Methode

Bild 104 zeigt weiterhin ein geometrisch komplexes Bauteil: eine Motorhaube. Die Messergebnisse eines Kreises der Motorhaube sind identisch nach den vier verschiedenen vollständigen Bezugssystemen. Das jeweilige Bezugssystem beschränkt ebenfalls alle 6 Freiheitsgrade des Bauteils, daher sind die Messergebnisse identisch. Die Anwendbarkeit der neu entwickelten Theorien in Kapitel 6 wird dadurch nochmals bestätigt.

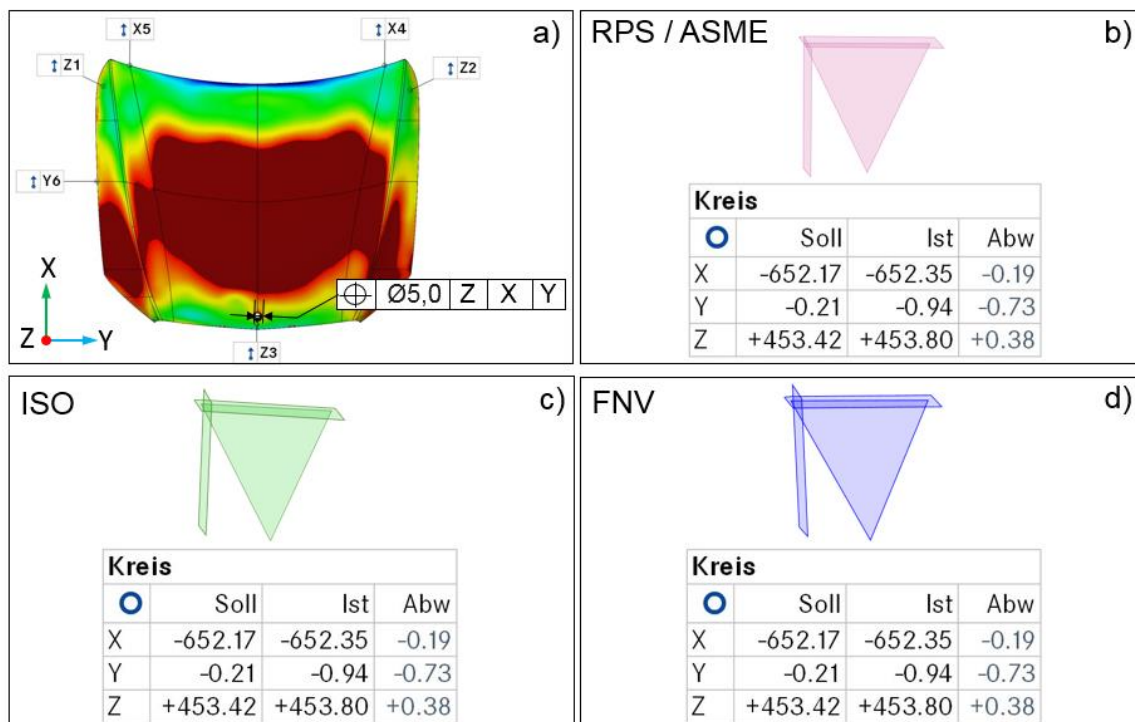


Bild 104 Messergebnisse des Kreises einer Motorhaube nach unterschiedlichen Bezugssystemen: a) Messergebnisse der Oberfläche; Messergebnis des Kreises b) nach der RPS-/ASME-Methode; c) nach der ISO-Methode und d) nach der FNV-Methode

9.1.2 Praxisumsetzung für einen Punkt auf einer Fläche als Bezug

In ISO 5459 wurde nur der Mittelpunkt einer Kugel als Bezugspunkt definiert. Der Fall eines Punktes auf einer Fläche ist in ISO nicht definiert. Daher wurde in Kapitel 4.3.1 die folgende neue Theorie für einen Punkt auf einer Fläche als Bezug entwickelt: wenn eine Bezugsstelle auf einem ausgewählten Punkt auf der Kantenfläche eines Leichtbauteils liegt, blockiert die Bezugsstelle eine Translation des Leichtbauteils. Dieser ausgewählte Punkt kann als Bezugspunkt gekennzeichnet werden. Bild 105 zeigt das entsprechende Praxisbeispiel.

Bild 105a zeigt den CAD Datensatz des Bauteils. Das Bauteil ist eine Verstärkung des Fahrzeugaufbaus. Die Verstärkung mit dem Bezugssystem A, B und C ausgerichtet. Die Bezugsstelle C1 liegt auf der Kantenfläche und der entsprechende Bezugspunkt C schränkt die Translation des Bauteils in X-Richtung ein. Bild 105b zeigt die Praxisumsetzung von allen Bezugsstellen. Bild 105c stellt den Stift dar, welcher in der Praxis die Bezugsstelle C1 darstellt. Bild 105d zeigt die entwickelte Theorie, welche in Kapitel 4.3.1 in Bild 50c beschrieben wurde.

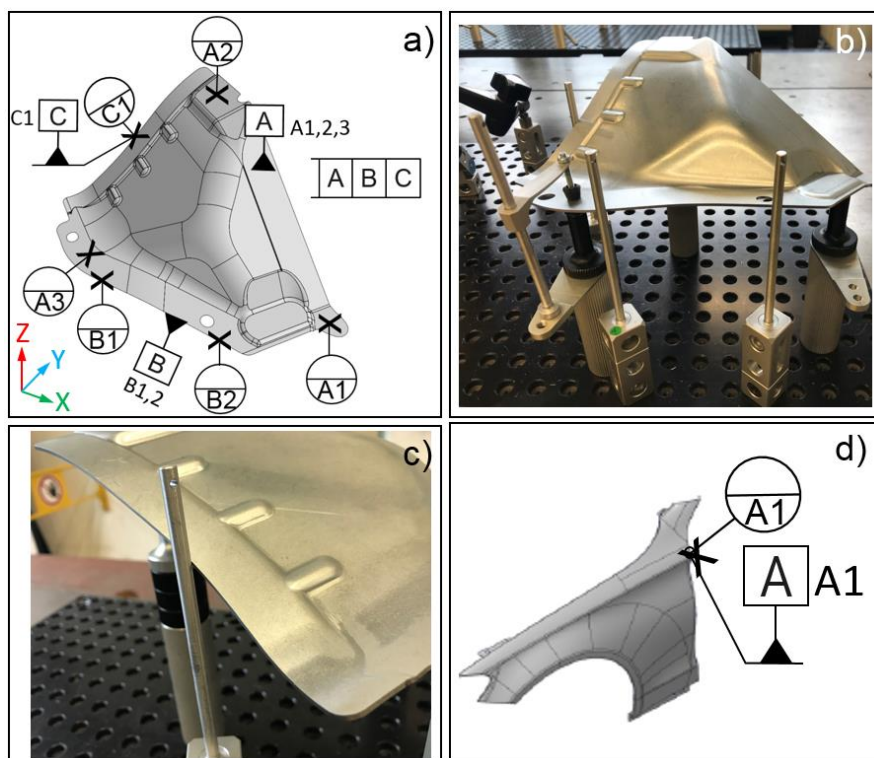


Bild 105 a) eine Verstärkung mit Bezugsstellen; b) Praxisumsetzung aller Bezugsstellen; c) Praxisumsetzung der Bezugsstelle C1; d) entsprechende Theorie für einen Punkt auf einer Fläche als Bezug

9.1.3 Praxisbeispiel für ein Rundloch, ein Langloch und ein Vierkantloch als Bezug

In Kapitel 2.1.2.1 wurde bereits beschrieben, dass in den ISO GPS Normen keine Definition für den Bezug eines Durchbruchs vorhanden ist. Daher wurde in Kapitel 4.4 die neue Theorie für den Bezug eines Durchbruchs entwickelt. In diesem Kapitel werden die folgenden vier neu entwickelten Theorien aus Kapitel 4.4 mit Praxisbeispielen dargestellt, um die Anwendbarkeit der neu entwickelten Theorien zu zeigen. Die vier ausgewählten Theorien sind:

1. Bezug für ein „Rundloch als 4-Wege-Durchbruch“ (Bild 106)
2. Bezug für ein „Langloch als 2-Wege-Durchbruch“ (Bild 106)
3. Bezug für ein „Vierkantloch als 4-Wege-Durchbruch“ (Bild 107)
4. Bezug für ein „Rundloch als 2-Wege-Durchbruch“ (Bild 108)

Das Auswahlkriterium ist nach der Anwendungshäufigkeit der Theorie in der Automobilindustrie festgelegt. Der Durchbruch wird in der Praxis oft als „Loch“ bezeichnet. Die Bilder 106 bis 108 zeigen die entsprechenden Praxisbeispiele.

Bild 106a ist das gleiche Bauteil wie in Bild 105a, jedoch mit anderen Bezügen ausgerichtet. Bezugssymbol B symbolisiert den sekundären Bezug auf der Mantelfläche des Rundlochs (Bild 106e). Dieser Bezug schränkt die Bewegungsrichtung des Bauteils in X und Y-Richtung ein. In der Praxis wird der Bezug B mit einem zylindrischen Bolzen verwendet (Bild 106b und Bild 106c). Der tertiäre Bezug C ist die horizontale mittlere Gerade des Langlochs (Bild 106f). Der Bezug C lässt für das Langloch in X-Richtung Bewegung zu, die Bewegung in Y-Richtung ist dadurch blockiert. Von daher werden die 6 Freiheitsgrade des Bauteils mit der primären Bezugsebene A, dem sekundären Bezug B „Rundloch als 4-Wege-Durchbruch“ und dem tertiären Bezug C „Langloch als 2-Wege-Durchbruch“ beschränkt. Bild 106d zeigt zusätzlich die Draufsicht ohne zylindrischen Bolzen des Rundlochs und des Langlochs.

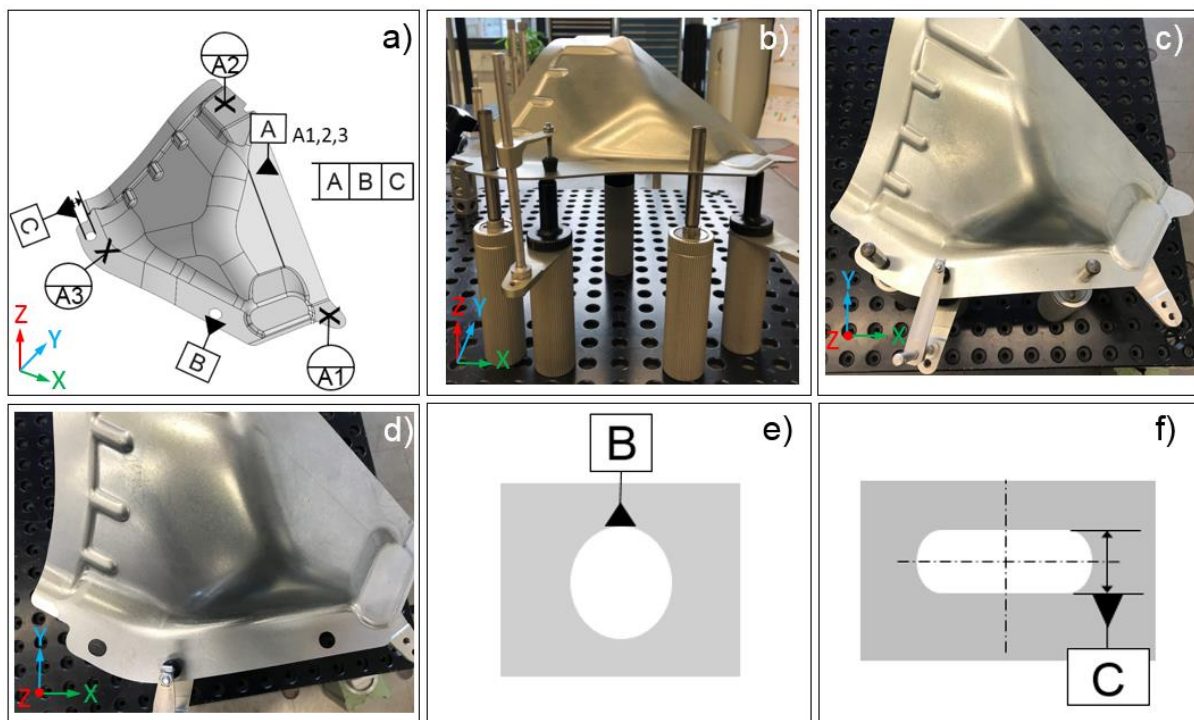


Bild 106 a) eine Verstärkung mit Bezügen; b) Praxisumsetzung aller Bezügen; c) Praxisumsetzung der Rundloch- und Langloch-Bezüge; d) Draufsicht des Rund- und Langlochs ohne Bolzen; e) Darstellung des Rundlochs als 4-Wege-Durchbruch; f) Darstellung des Langlochs als 2-Wege-Durchbruch

Bild 107a zeigt eine B-Säule eines Fahrzeugs. Das Bauteil wird in der Draufsicht von der Y-Achse dargestellt. Die primäre Bezugsebene A blockiert die Y-Translation und die Rotationen um die Z- und X-Achse. Der sekundäre Bezug B ist der Mittelpunkt des Vierkantlochs; er blockiert die Z- und X-Translation. Die Praxisumsetzung des Mittelpunkts als Bezug ist der zylindrische Bolzen (Bild 107b). Der tertiäre Bezug C ist die mittlere Gerade des Langlochs,

welcher durch die gleiche Theorie erklärt würde, wie bereits in Bild 106f dargestellt. Dieser Bezug C beschränkt die Rotation um die Y-Achse durch die zusätzliche Blockierung der X-Translation.

Bild 107c zeigt eine andere Darstellungsweise für den Vierkantloch-Bezug B und den Langlochbezug C. Der Bezug B wird in diesem Fall mit der Bezugsstelle X4 und Z6 dargestellt, da der Bezug B die Translation in X- und Z-Richtung einschränkt. Der Bezug C wird in diesem Fall mit der Bezugsstelle X5 gekennzeichnet, da der Bezug C die Rotation um die Y-Achse durch die Blockierung der X-Translation einschränkt. Das ideale Bauteil (CAD-Datensatz) wird mit dem realen Bauteil auf die definierten 6 Bezugsstellen ausgerichtet. Bild 107d zeigt die Messergebnisse von den jeweiligen Bezugsstellen X4, Z6 und X5. Definitionsgemäß dürfen die Bezugsstellen keine Abweichungen zu dem realen Bauteil haben. Das heißt, dass das reale Bauteil exakt auf den definierten Bezugsstellen des CAD-Datensatzes liegt. Bild 107d ist der Nachweis der Anwendbarkeit der Theorie für das Vierkantloch als Bezug B und das Langloch als Bezug C, da die X4 in X-Richtung, Z6 in Z-Richtung und X5 in X-Richtung keine Abweichungen (grün markiert) aufweisen.

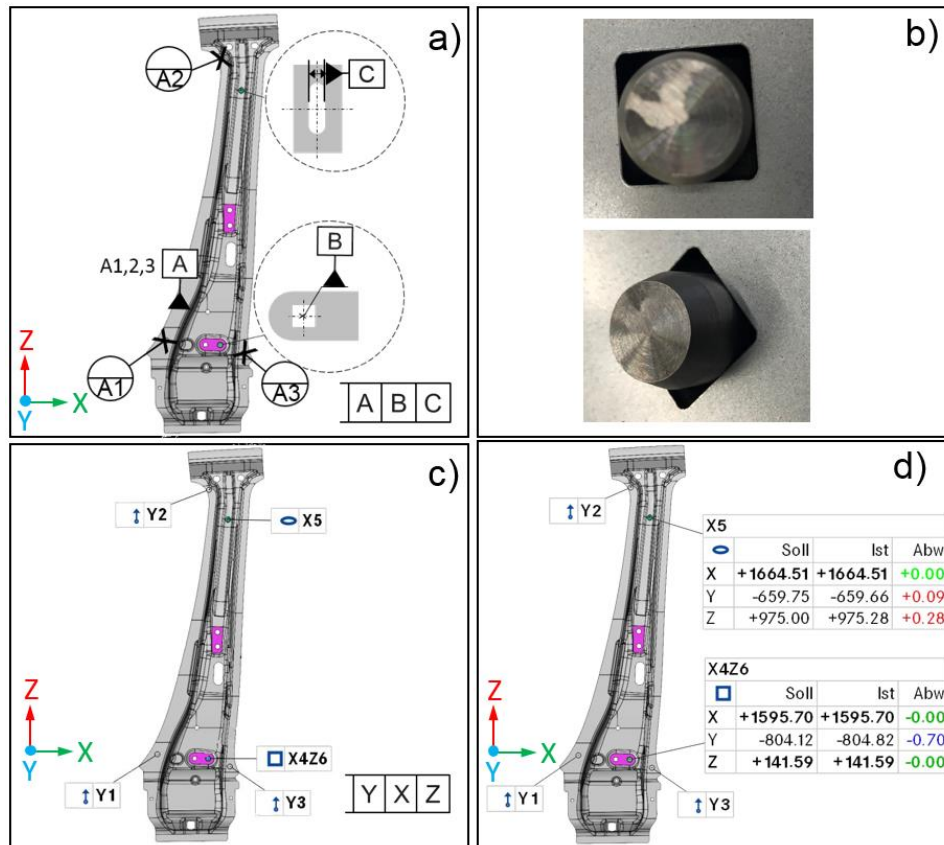


Bild 107 a) eine B-Säule mit Bezügen; b) Praxisumsetzung des Vierkantlochs als Bezug; c) Darstellung mit Bezugsstellen; d) Messergebnis der Bezugsstellen

Bild 108a zeigt ein Leichtbauteil mit Rundlöchern und einer Linearführung. Der Bezug für das „Rundloch als 2-Wege-Durchbruch“ ist aus Bild 108d ersichtlich. Der Bezug ist die horizontale mittlere Gerade. Bild 108b zeigt die Linearführung als Symbolisierung des Bezugs in der Praxis. Durch die Linearführung kann das Rundloch nur in eine Richtung (grüner Pfeil) bewegt werden. Bild 108c stellt die Draufsicht des Leichtbauteils mit der Linearführung dar.

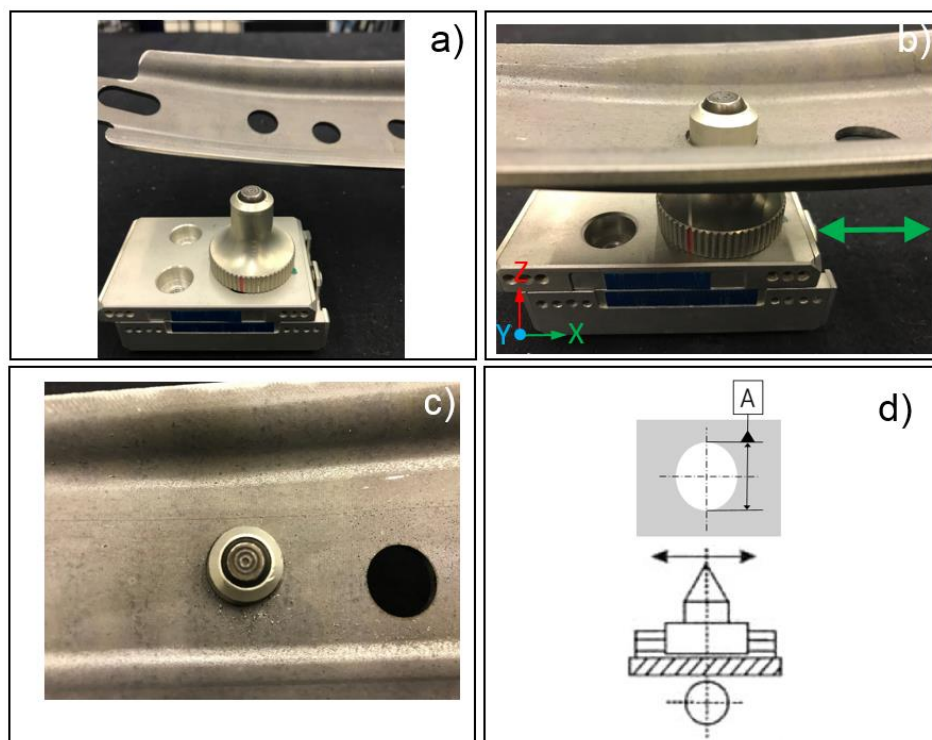


Bild 108 a) ein Leichtbauteil mit der Linearführung; b) Praxisumsetzung des Rundlochs als Bezug; c) Draufsicht; d) Darstellungsweise für den Bezug vom „Rundloch als 2-Wege-Durchbruch“

9.2 Praxisbeispiele für Tolerierungen

Nach den Praxisbeispielen für Bezüge werden in diesem Kapitel die ergänzten und erweiterten Tolerierungstheorien mit verschiedenen Praxisbeispielen aus vier Bereichen dargestellt, um die Anwendbarkeit dieser ausgewählten neu entwickelten Theorien in der Praxis zu zeigen. Die vier Bereiche sind: Kapitel 9.2.1 neue Definition für eine Verbundtoleranz anhand einer Flächenprofiltoleranz; Kapitel 9.2.2 erweiterte Definition der Linienprofiltoleranz; Kapitel 9.2.3 erweiterte Definition für einen realen Punkt als toleriertes Geometrieelement und Kapitel 9.2.4 erweiterte Definition für die Positionstoleranz ohne Verwendung eines Durchmesserymbols für ein Loch.

9.2.1 Praxisumsetzung der neuen Definition für eine Verbundtoleranz anhand einer Flächenprofiltoleranz

In den ISO GPS Normen gibt es, wie bereits in Kapitel 2.1.3.2 beschrieben, keine Definition für eine Verbundtoleranz. Eine entsprechende neue Systematik wurde in Kapitel 7.3 entwickelt, um die neue Definition zur Verbundtoleranz für Flächenprofiltoleranz darzustellen. Bild 109 zeigt das entsprechende Praxisbeispiel.

Bild 109a zeigt gleiche Bauteil wie in Bild 107c. Zwei farbig markierte Auflagenflächen werden mit der Flächenprofil-Verbundtoleranz toleriert. Diese Verbundtoleranz ist die Ortstoleranz mit zusätzlicher Formtoleranz. Die Ortstoleranzzonen der zwei Flächen sind im Raum mit einer Toleranzbreite von 6 mm festgelegt. Die Formtoleranzzonen besitzen eine Breite von 3 mm, welche in einer beliebigen Position innerhalb der Ortstoleranzzone liegt. Die funktionsbasierten Toleranzzonen für die Flächen sind der Kreuzungsbereich der Orts- und der Formtoleranzzone. Die realen Flächen dürfen eine beliebige Form innerhalb der Formtoleranzzone haben. Bild 109b zeigt die Messergebnisse der zwei Flächen mit der Farbverlauf-Darstellung. Bild 109c ist die Theorie aus Kapitel 7.3.2 (Bild 80). Diese Definition füllt die Definitionslücke in den ISO GPS Normen.

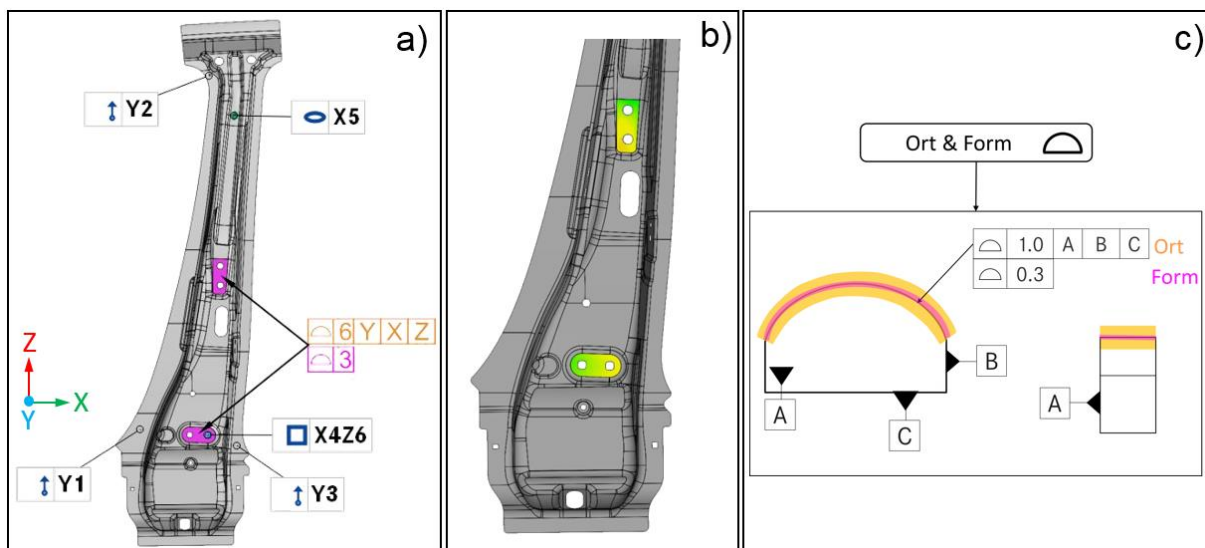


Bild 109 a) ein Bauteil mit einer Flächenprofil-Verbundtoleranz; b) Messergebnis der zwei tolerierten Flächen; c) Zeichnung für die Verbundtoleranz der Flächenprofiltoleranz: Ort und Form

9.2.2 Praxisumsetzung der erweiterten Definition der Linienprofilltoleranz

In ISO 1101 und 1660 darf die Kante von einem dünnwandigen Bauteil nicht mit einer Linienprofilltoleranz toleriert werden. In Kapitel 7.1.2 wurde dies als Defizit erkannt und die entsprechende Definition erweitert. Hier wird nun die Anwendbarkeit dieser erweiterten Definition in der Praxis gezeigt. Bild 110a zeigt ein dünnwandiges Blechteil, welches durch Bezugsstellen ausgerichtet wird. Die Kante wird mit einem Kugeltaster (Durchmesser 1 mm) angetastet und gemessen. Bild 110b zeigt dazu die Vergrößerung. Der Kugeltaster wird mit seinem äußersten Punkt an die Kante angetastet und ein Punkt der Kante gemessen. Der Kugeltaster wird entlang der Kante (Bild 110c) bewegt und es werden weitere Punkte an der Kante gemessen. Durch die Punkte wird eine Linie erzeugt. Diese Linie ist die reale Kante. Dies zeigt, dass die Kante eines dünnwandigen Bauteils in der Praxis tatsächlich als eine Linie und nicht als eine Fläche aufgefasst wird. Diese Vorgehensweise bei der Messung zeigt die Anwendbarkeit der Theorie der Ergänzung und Erweiterung der Linienprofilltoleranz dieser Arbeit in der Praxis.

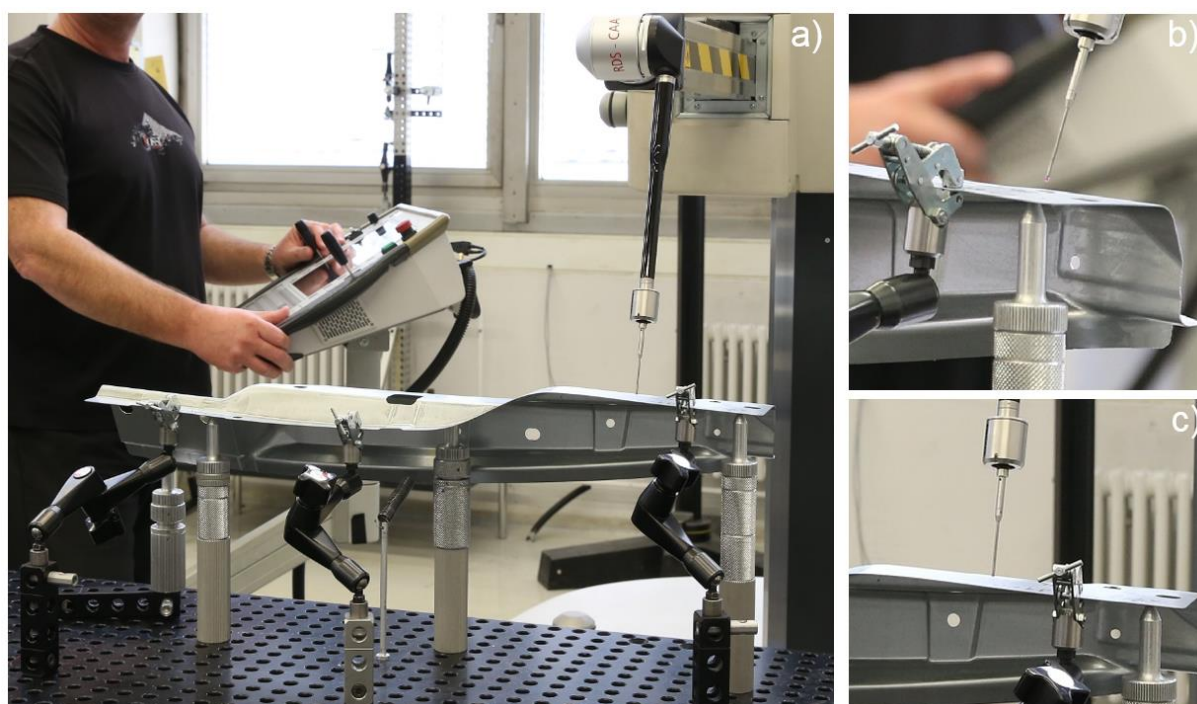


Bild 110 Vorgehensweise bei der Messung einer Kante eines dünnwandigen Bauteils in der Praxis. a) Antasten der Kante mit einem Kugeltaster mit Durchmesser 1 mm, b) Vergrößerungsbild und c) andere Ansicht

9.2.3 Praxisumsetzung der erweiterten Definition für einen realen Punkt als toleriertes Geometrieelement

In ISO GPS ist ein punktförmiges TGE immer der Mittelpunkt einer Kugel. Ein realer integraler Punkt wird in ISO nicht berücksichtigt. Dies wurde bereits in Kapitel 2.1.4.1 beschrieben. In Kapitel 8.1.1 wurde dazu eine neue Systematik für die Tolerierung eines realen integralen Punkts mit Positionstoleranz entwickelt. Im vorliegenden Kapitel werden die folgenden drei neu entwickelten Theorien aus Kapitel 8.1.1 anhand von Praxisbeispielen dargestellt, um die Anwendbarkeit der neu entwickelten Theorien zu zeigen. Die drei ausgewählten Theorien sind:

1. Tolerierung eines Punkts auf einer Flächen (Bild 111)
2. Tolerierung eines Punkts auf einer Geraden (Bild 112)
3. Tolerierung eines Eckpunkts (Bild 113)

Bild 111a zeigt beispielhaft die in Kapitel 8.1.1 entwickelte Theorie für einen Punkt auf einer Fläche. Dieser Punkt darf nur ohne Angabe des Durchmesserymbols \emptyset im Toleranzindikator angegeben werden, der Grund hierfür wurde in Kapitel 8.1.1 beschrieben. Die entsprechende Toleranzzone (Bild 111b) ist eine Linie und die Länge ist gleich dem Toleranzwert. Bild 111c zeigt die Anwendung dieser Theorie in der Praxis auf einer Randfläche einer Heckleuchte. Wegen der Abbildung der Fuge zwischen der Heckwandtür und der Heckleuchte muss die Randfläche der Heckleuchte explizit toleriert werden. In der Praxis werden viele Punkte aus der Randfläche ausgewählt und mit der Positionstoleranz toleriert (Bild 111d). Die Schnittdarstellung ist in Bild 111e gezeigt. Die Toleranzzone des ausgewählten einzelnen Punktes ist eine Linie, welche senkrecht zu der Randfläche steht. Der ausgewählte Punkt darf nur innerhalb dieser Linie bewegt werden. Mit dieser neu entwickelten Theorie kann die Randfläche explizit toleriert werden.

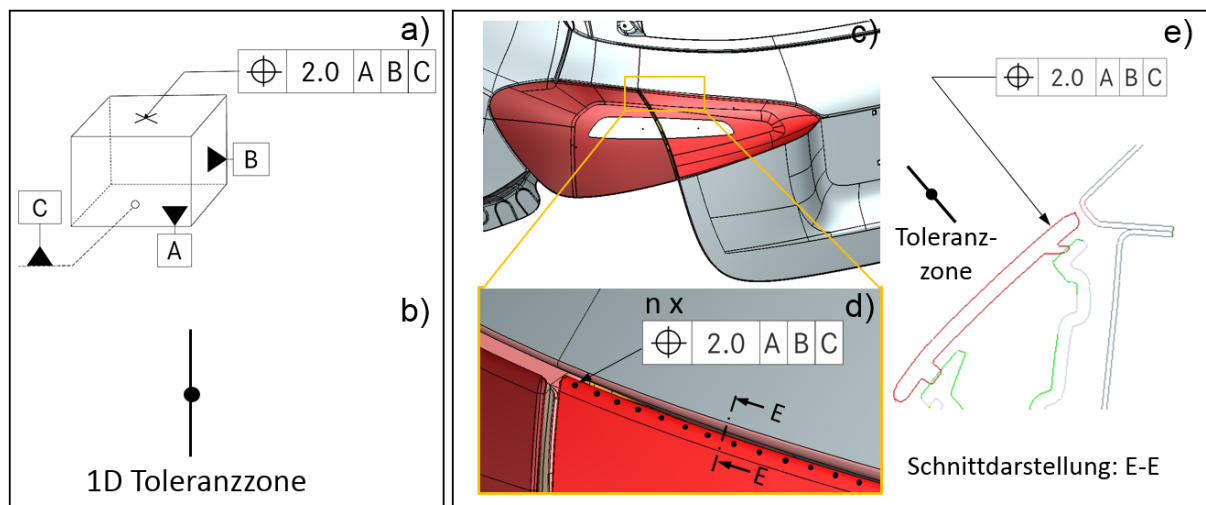


Bild 111 a) Theorie zum Punkt auf einer Fläche; b) Toleranzzone; c) Praxisbeispiel; d) Tolerierung der ausgewählten Punkte auf der Randfläche; e) Schnittdarstellung der Heckleuchte

Bild 112a stellt die entwickelte Theorie für einen Punkt auf einer Geraden dar. Dieser Punkt darf mit oder ohne Angabe des Durchmesserymbols \varnothing toleriert werden. Die entsprechende Toleranzzone (Bild 112b) ist entweder ein Kreis oder ein Quadrat. Bild 112c zeigt die Anwendung in der Praxis an einem Radius einer PKW-Seitenwand. Um die Türdichtung genau an den Radius der Seitenwand anlegen zu können, muss dieser Radius explizit toleriert werden. Daher werden in der Praxis ebenfalls viele Punkte aus dem Radius ausgewählt und mit einer Positionstoleranz toleriert (Bild 112d). Die Bild 112e und Bild 112f zeigen die Schnittdarstellung des Radius. Es ist nicht möglich die ausgewählten Punkte aus dem CAD-Datensatz in der Praxis darzustellen, da der Kugeltaster jedes Mal einen anderen Punkt antasten würde. Von daher muss ein „theoretischer Punkt“ definiert werden, sodass die Toleranzzone anhand dieses „theoretischen Punkts“ festgelegt werden kann. Der theoretische Punkt wird durch den Schnittpunkt zweier Linien erzeugt (Bild 112e). Beide Linien sind durch jeweils zwei vordefinierte Punkte aus der PKW-Seitenwand definiert. Wenn der vom Kugeltaster erzeugten angetasteten Punkt innerhalb der Toleranzzone liegt, dann ist das Bauteil korrekt (Bild 112f). Mit dieser neu entwickelten Theorie kann der Radius explizit toleriert werden.

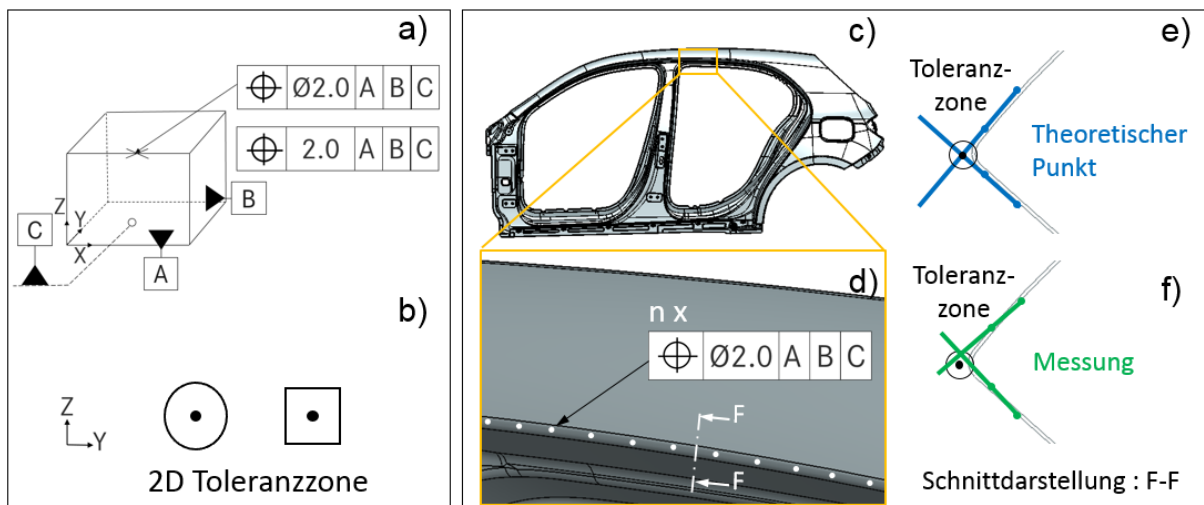


Bild 112 a) Theorie zum Punkt auf einer Gerade; b) Toleranzzone; c) Praxisbeispiel; d) Tolerierung der ausgewählten Punkte auf dem Radius; e) Schnittdarstellung des Radius und Bedeutung des „theoretischen Punktes“; f) Schnittdarstellung des Radius und gemessene Punkte

Bild 113a stellt die erweiterte Definition des Positionstoleranzsymbols für einen Eckpunkt dar. Dieser Punkt darf nur mit oder ohne sphärisches Durchmesserymbol $S\varnothing$ angegeben werden. Die entsprechende Toleranzzone ist entweder eine Kugel oder ein Würfel (Bild 113b). Bild 113c zeigt die Anwendung dieser Theorie in der Praxis anhand eines Eckpunktes eines Kotflügels. Aufgrund des Korrosionsschutzes zwischen der Motorhaube und dem Kotflügel muss der Eckpunkt eines Kotflügels explizit toleriert werden. Mit Hilfe dieser erweiterten Definition kann dieser Eckpunkt in der Praxis direkt mit der Positionstoleranz toleriert werden (Bild 113d). In diesem Fall ist die Toleranzzone eine Kugel. Bild 113e zeigt eine andere Darstellung dieses Punktes. Es gibt drei Messmethoden in der Praxis, um diesen Eckpunkt zu messen:

1. *Direkte Messung mit einem Kugeltaster:* Der Eckpunkt wird direkt vom Kugeltaster angetastet. Diese Methode führt zu größeren Zufallsfehlern durch die Antastrichtung, den Durchmesser des Kugeltasters und die menschliche Beurteilung (Bild 113f).
2. *Indirekte Messung:* Durch die Messung von den drei Flächen wird der gemessene Eckpunkt als deren Schnittpunkt erzeugt. Wenn dieser Schnittpunkt innerhalb der definierten Toleranzzone liegt, ist der Eckpunkt korrekt (Bild 113g).
3. *3D Scanner:* Der Eckpunkt wird von einem 3D Scanner digital erfasst. Dabei wird eine sogenannte Punktwolke erzeugt. Anhand der Punktwolke kann der Messtechniker beurteilen, ob der Eckpunkt korrekt ist (Bild 113h).

Mit dieser erweiterten Definition kann die Tolerierung des Eckpunkts explizit beschrieben werden.

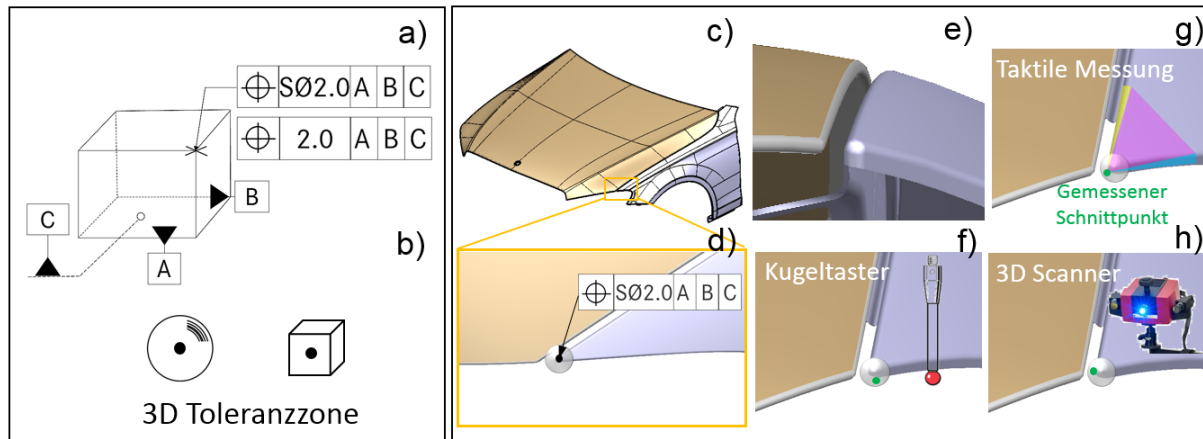


Bild 113 a) Erweiterte Definition zum Eckpunkt; b) Toleranzzone; c) Praxisbeispiel; d) Tolerierung des Eckpunkts; e) Darstellung des Eckpunkts; f) Kugeltaster-Messmethode; g) Taktile Messung; h) 3D Scanner Messung

9.2.4 Praxisbeispiel für die Positionstoleranz ohne Verwendung eines Durchmessersymbols für ein Loch

In den ISO GPS Normen wird die Tolerierung eines Mittelpunkts nur mit einem Durchmessersymbol \emptyset oder mit Orientierungsebenen-Indikatoren definiert. Der Fall eines Toleranzindikators ohne Durchmessersymbol \emptyset wird in ISO nicht beschrieben. Dies wurde in Kapitel 2.1.4 als Defizit festgestellt. Die dazu erweiterte und ergänzte Theorie lautet: Wenn keine Angabe des Durchmessersymbols für einen Mittelpunkt vorhanden ist, wird die Toleranzzone als Quadrat bezeichnet. Diese quadratische Toleranzzone orientiert sich an dem angegebenen Bezugssystem. Diese Theorie wurde bereits in Kapitel 8.1 beschrieben. Bild 114 stellt das entsprechende Praxisbeispiel dar. Das Bauteil ist eine A-Säule von einem PKW. Das tolerierte Rundloch ist ein Funktionsloch, daher muss die Position des Mittelpunkts genau toleriert werden. In dem Toleranzindikator gibt es kein \emptyset . Folglich ist die Toleranzzone quadratisch. Diese Kennzeichnungsweise wird häufig in der Automobilindustrie verwendet. Mit dieser erweiterten Definition kann die Tolerierung der Position des Mittelpunkts von einem Loch explizit beschrieben werden.

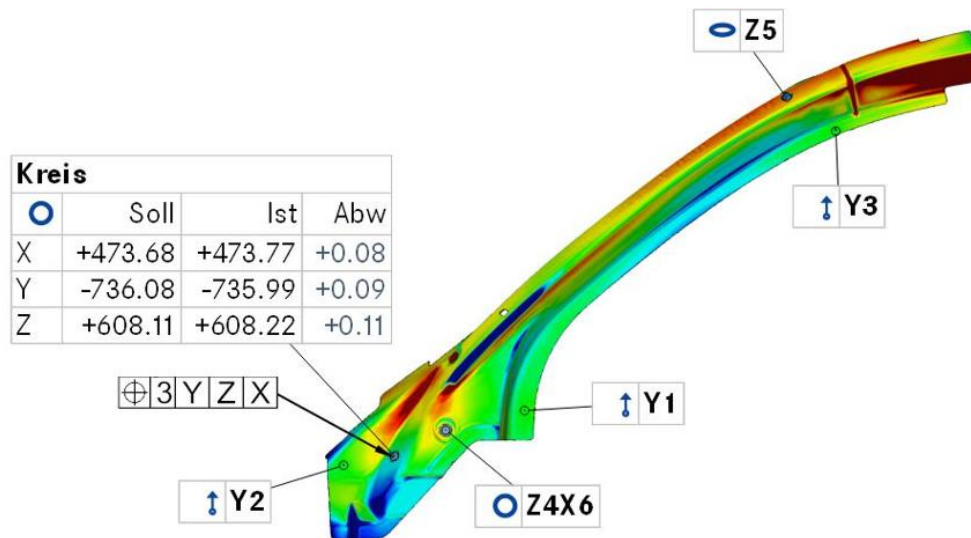


Bild 114 Tolerierung der Position eines Mittelpunkts von einem Rundloch in der A-Säule ohne Verwendung eines Durchmessersymbols

10 Zusammenfassung und Ausblick

Die ISO GPS Normen sind nach den geometrischen Merkmalen eines Werkstücks in verschiedene Phasen des Lebenszyklus, nicht nach der Art des Geometrieelementes, unterteilt. Dies führt zu Unvollständigkeiten in den ISO GPS Normen. In dem Forschungsgebiet zu Bezügen und Tolerierungen für Geometrieelemente wird die Vollständigkeit und Widerspruchsfreiheit der ISO GPS Normen nicht überprüft bzw. als gegeben angenommen. Die Unvollständigkeit der ISO GPS Normen zu Bezügen und Tolerierungen verursacht Definitionslücken und Defizite in der Theorie und in der Praxis, welche wiederum zu Missverständnissen und Irreproduzierbarkeiten führen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein komplett neues Denkmodell „Analyse der Herkunft eines Geometrieelements für Bezüge und Tolerierungen“ entwickelt. Mit diesem Denkmodell wurde eine vollständige Systematik zu Bezügen und Tolerierungen für alle Geometrieelemente auf Basis von ISO 1101, ISO 5459, ISO 1660 und ISO 5458 auf einer rein theoretischen Ebene entwickelt. Diese Systematik enthält viele neu entwickelte Theorien zu Bezügen und Tolerierungen, welche nicht nur für Regelgeometrieelemente aus dem klassischen Maschinenbau, sondern auch für Freiformgeometrien aus speziellen Bereichen, wie z.B. der Automobil- oder der Luftfahrtindustrie, anwendbar sind.

Diese entwickelte Systematik besteht aus zwei GPS-Systematiken: zuerst wurde der Aufbau der Bezüge und Bezugssysteme für alle Geometrieelemente analysiert, indem das Denkmodell zur Herkunft des Bezugs analysiert wurde. Die Theorie für die Ergänzung und Erweiterung der Definitionen zum Aufbau der Einzelbezüge und gemeinsamen Bezüge wurde auf Basis von ISO 5459 erstellt. Anschließend wurde die neu entwickelte funktionsbasierte Flächennormalvektor-Methode (FNV-Methode) zum Aufbau der Bezugssysteme für Geometrieelemente, insbesondere für komplexe Geometrieelemente entwickelt.

Anschließend wurden die Definitionen für die Haupttoleranzsymbole (Profiltoleranz und Positionstoleranz), welche die restlichen Toleranzsymbole ersetzen können, und ihre Verbundtoleranz auf Basis von ISO 1101, ISO 1660 und ISO 5458 ergänzt und erweitert. Die neu entwickelte Theorie beseitigt den Interpretationsspielraum der Toleranzsymbole für tolerierte Geometrieelemente. Das in der Automobilindustrie häufig verwendete Geometrieelement eines dünnwandigen Leichtbauteils kann nun mit den erweiterten Definitionen der Haupttoleranzsymbole und ihrer Verbundtoleranz eindeutig toleriert werden.

Die vorliegende Arbeit ist eine rein theoretische Arbeit. Die Anwendbarkeit einiger Theorien, die für die Automobilindustrie besonders wichtig sind, wurde beispielhaft mit konkreten Bauteilen mittels Messsoftware in der Praxis gezeigt. Alle neu entwickelten Systematiken wurden in zwei Gruppen aufgeteilt: praxisorientiert und theoretisch-existierend.

Diese Arbeit möge als ein Beitrag zur Verbesserung der ISO Normen verstanden werden. Die Vorschläge aus dieser Arbeit sollten auf einem internationalen ISO Gremium von Experten aus ISO/TC 213 diskutiert, evaluiert und nach Möglichkeit in die ISO Normen aufgenommen werden. Das Denkmodell der aktuell gültigen ISO GPS Normen sollte aktualisiert werden, da die ISO GPS Normen keine Sammlung werden sollten, welche immer mehr Beispiele aus den einzelnen Erfahrungen der Experten darstellen sollten. Die ISO GPS Normen sollten eine grundsätzliche Analyse für alle Geometrielemente beschreiben. Die neu entwickelte Theorie besitzt einen großen Anwendungsbereich und bedient das einheitliche Verständnis der Definition von Bezügen und Tolerierungen zwischen den verschiedenen Produktentstehungsbereichen. Zusätzlich bietet sie die funktionsbasierte Definition zu Darstellungsweisen für 3D Tolerierungen an. Die neu entwickelte Systematik, die Methode und die Denkmodelle können ebenfalls für die Ergänzung und Erweiterung der ASME Y14.5 verwendet werden.

11 Literaturverzeichnis

- [1] „ISO/TC 213 Published ISO Standards,“ [Online]. Available: <https://www.iso.org/committee/54924.html>. [Zugriff am 25 07 2017].
- [2] „ISO/TC 213 Participating Members,“ [Online]. Available: <https://www.iso.org/committee/54924.html?view=participation>. [Zugriff am 25 07 2017].
- [3] M. Bohn und K. Hetsch, Toleranzmanagement im Automobilbau, München: ISBN 9783446435445, Carl Hanser Verlag, 2013.
- [4] M. Bohn und K. Hetsch, Funktionsorientiertes Toleranzdesign, München: ISBN 9783446450097, Carl Hanser Verlag, 2017.
- [5] C. Bruns, „Toleranzmanagement in der Konstruktion mit sich ändernden Normen,“ Presentation © INNEO Solutions GmbH, SAXSIM – Saxon Simulation Meeting, 2014.
- [6] G. Effenberger, „Geometrische Produktspezifikation GPS Konsequenzen für die Tolerierung von Maßelementen,“ TEQ® Training & Consulting GmbH, 2013.
- [7] Internationaler Standard Organisation, DIN EN ISO 14638 Geometrische Produktspezifikation (GPS)– MatrixModell, 2015.
- [8] Internationaler Standard Organisation, DIN EN ISO 5459 Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrische Tolerierung - Bezüge und Bezugssysteme, 2013.
- [9] Internationaler Standard Organisation, DIN EN ISO 5459 (Entwurf) Geometrische Produktspezifikation (GPS)- Geometrische Tolerierung - Bezüge und Bezugssysteme, 2016.
- [10] Internationaler Standard Organisation, DIN EN ISO 1101 Geometrische Produktspezifikation (GPS)– Geometrische Tolerierung– Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf, 2017.

-
- [11] The American Society of Mechanical Engineers, ASME Y14.5 Dimensioning and Tolerancing, New York, 2009.
- [12] „Deutsches Institut für Normung e. V.: Wir über uns,“ [Online]. Available: <http://www.din.de/de>. [Zugriff am 25 07 2017].
- [13] „Europäisches Komitee für Normung: About us,“ [Online]. Available: <https://www.cen.eu/Pages/default.aspx>. [Zugriff am 25 07 2017].
- [14] „Europäisches Komitee für Normung: Mitgliedsstaaten,“ [Online]. Available: <https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=CENWEB:5>. [Zugriff am 25 07 2017].
- [15] Internationaler Standard Organisation, DIN EN ISO 1660 Geometrische Produktspezifikation (GPS)- Geometrische Tolerierung- Profiltolerierung, 2017.
- [16] Internationaler Standard Organisation, DIN EN ISO 5458 Geometrische Produktspezifikation (GPS) Form- und Lagetoleranzen Positionstolerierung, 1999.
- [17] Internationaler Standard Organisation, DIN EN ISO 5458 (Entwurf) Geometrische Produktspezifikation (GPS)– Form- und Lagetolerierung– Positions- und Mustertolerierung, 2016.
- [18] Internationaler Standard Organisation, DIN EN ISO 8015 Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen – Konzepte, Prinzipien und Regeln, 2011.
- [19] Internationaler Standard Organisation, DIN EN ISO 5459 (Entwurf) Geometrische Produktspezifikation (GPS)- Geometrische Tolerierung - Bezüge und Bezugssysteme, 2017.
- [20] Internationaler Standard Organisation, ISO/FDIS 5458, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrische Tolerierung - Muster und kombinierte geometrische Spezifikation, 2017.
- [21] American Society of Mechanical Engineers, ASME Y14.5M Dimensioning and Tolerancing, New York, 1994.
- [22] M. Bohn und K. Hetsch, „Bezüge und Toleranzen-Spannungsfeld Norm und reale anwendung,“ in *XIV. International Colloquium on Surfaces*, Chemnitz, 2017.

- [23] „Wortbedeutung.info,“ Achse Wortbedeutung und DEfinition, [Online]. Available: <http://www.wortbedeutung.info/Achse/>. [Zugriff am 17 08 2017].
- [24] W. Beitz und K.-h. Küttner, *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau*, 15.Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1983.
- [25] T. Lehrerfreund, „Was ist Welle, was ist Achse,“ 24 November 2014. [Online]. Available: <https://www.lehrerfreund.de/technik/1s/was-ist-welle-was-achse/4539>. [Zugriff am 13 09 2017].
- [26] Reverso Wörterbuch, „Definition von Achse,“ [Online]. Available: <http://woerterbuch.reverso.net/deutsch-definition/Achse>. [Zugriff am 13 09 2017].
- [27] Internationaler Standard Organisation, „DIN EN ISO 286-2, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – ISO-Toleranzsystem für Längenmaße – Teil 2: Tabellen der Grundtoleranzgrade und Grenzabmaße für Bohrungen und Wellen,“ 2010.
- [28] Internationaler Standard Organisation, „DIN EN ISO 14660-2, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrielemente Teil 2: Erfasste mittlere Linie eines Zylinders und eines Kegels, erfasste mittlere Fläche, örtliches Maß eines erfassten Geometrieelementes,“ 1999.
- [29] Internationaler Standard Organisation, *DIN ISO 129-1, Technische Zeichnungen- Eintragung von Maßen und Toleranzen Teil 1: Allgemeine Grundlagen*, 1998.
- [30] Internationaler Standard Organisation, *DIN ISO 128-20, Technische Zeichnungen- Allgemeine Grundlagen der Darstellung Teil 20: Linien, Grundlagen*, 1997.
- [31] Internationaler Standard Organisation, „ISO 128-24, Technical drawings — General principles of presentation — Part 24: Lines on mechanical engineering drawings,“ 2014.
- [32] Internationaler Standard Organisation, „ISO 16792, Technische Produktdokumentation- Verfahren für digitale Produktdefinitionsdaten,“ 2015.
- [33] Deutsches Institut für Normung, „DIN 199-1, CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten Teil 1: Begriffe,“ 2002.

-
- [34] Internationaler Standard Organisation, „DIN EN ISO 10209, Technische Produktdokumentation – Begriffe für technische Zeichnungen, Produktdefinition und verwandte Dokumentation,“ 2012.
- [35] Internationaler Standard Organisation, „DIN EN ISO 3098-5, Technische Produktdokumentation Schriften Teil 5: CAD-Schrift des lateinischen Alphabetes sowie der Ziffern und Zeichen,“ 1998.
- [36] Internationaler Standard Organisation, „DIN EN ISO 3098-0, Technische Produktdokumentation Schriften Teil 0: Grundregeln,“ 1998.
- [37] J. Grimm und W. Grimm, „Deutsches Wörterbuch,“ in *16 Bände in 32 Teilbänden*, Leipzig, 1854-1961.
- [38] J. C. Adelung, „Grammatisch-kritisches Wörterbuch der Hochdeutschen Mundart,“ in *Zweyte, vermehrte und verbesserte Ausgabe*, Leipzig, 1793-1801.
- [39] H. A. Eimaraghy, *Geometric design tolerancing: theories, standards and applications*, ISBN 9781461376569, Springer-science + business media B.V., 1998.
- [40] P. Campbell, *Basic Fixture Design*, New York: Industrial Press Inc., 1994.
- [41] Internationaler Standard Organisation, *DIN EN ISO 81714-1 Gestaltung von graphischen Symbolen für die Anwendung in der technischen Produktdokumentation-Teil 1: Grundregeln*, 2010.
- [42] Internationaler Standard Organisation, *DIN EN ISO 286-1 Geometrische Produktspezifikation (GPS) – ISO-Toleranzsystem für Längenmaße – Teil 1: Grundlagen für Toleranzen, Abmaße und Passungen*, 2010.
- [43] Internationaler Standard Organisation, *DIN EN ISO 25378 Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Merkmale und Bedingungen – Begriffe*, 2011.
- [44] Internationaler Standard Organisation, *DIN ISO 2768-1 Allgmeintoleranzen Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung*, 1991-06.
- [45] Internationaler Standard Organisation, *DIN ISO 2768-2 Allgmeintoleranzen Toleranzen für Form- und Lage ohne einzelne Toleranzeintragung*, 1991-04.

- [46] Deutsches Institut für Normung, DIN 6930-2 Stanzteile aus Stahl – Teil 2: Allgmeintoleranzen, 2011.
- [47] Internationaler Standard Organisation, DIN EN ISO 8062-3 Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Maß-, Form- und Lagetoleranzen für Formteile – Teil 3: Allgemeine Maß-, Form- und Lagetoleranzen und Bearbeitungszugaben für Gussstücke, 2008.
- [48] Deutsches Institut für Normung, DIN 16742 Kunststoff-Formteile – Toleranzen und Abnahmebedingungen, 2013.
- [49] Internationaler Standard Organisation, DIN EN ISO 12781-1, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Ebenheit - Teil 1: Begriffe und Kenngrößen der Ebenheit.
- [50] Internationaler Standard Organisation, DIN EN ISO 12780-1, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geradheit - Teil 1: Begriffe und Kenngrößen der Geradheit, 2011.
- [51] Internationaler Standard Organisation, DIN EN ISO 12181-1, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Rundheit - Teil 1: Begriffe und Kenngrößen der Rundheit, 2011.
- [52] Internationaler Standard Organisation, DIN EN ISO 17450-3, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen – Teil 3: Tolerierte Geometrieelemente, 2016.
- [53] Internationaler Standard Organisation, „DIN EN ISO 1101, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf,“ 2014.
- [54] Q. Gu und Y. Wu, „The Composition Principle of the Datum Reference Frame,“ in *14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (CAT), Volume 43*, 226-231, 2016.
- [55] J. Guo, Y. Chu und Z. Xiong, „A geometric method for computation of datum reference frames,“ in *IEEE Transactions on Robotics and Automation. Volume 16, Issue 6*, 797-806, 2000.

- [56] G. Concheri, I. Cristofolini, R. Meneghello und G. Wolf, „Geometric Dimensioning and Tolerancing (GD&T) versus Geometrical Product Specification (GPS),“ in *XII ADM International Conference, Italy*, 2001.
- [57] E. Morse, „Tolerancing Standards: A Comparison,“ in *The Quality Magazine*, 2018.
- [58] J. Guo, Y. Chu und Z. Li, „A geometric approach to the establishment of datum reference frames,“ in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1999.
- [59] S. Nigam, J. Guilford und J. Turner, „Derivation of generalized datum reference frames for geometric tolerance analysis,“ in *Proceeding of the 19th Annual ASME Design Automation Conference*, 1993.
- [60] W. Tandler, „Establishing Datum Reference Frames,“ in *Inside Metrology, Quality Digest*, 2008.
- [61] V. Srinivasan, „Reflections on the Role of Science in the Evolution of Dimensioning and Tolerancing Standards,“ in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2013.
- [62] K. Spors und H. Hennig, Aufbau eines funktionsorientierten Bezugspunktsystems als Tolerierungsbasis für eine Pkw-Karosserie, 9. symposium ”Fertigungsgerechtes konstruieren” Schnaittach, 1998.
- [63] T. Reynolds und K.-E. Rosink, Guidelines For Establishing A Robust PLP Scheme, Tagungsband der IBEC (Internattional Body Engineering Conference) Detroit Michigan USA, 1996.
- [64] M. Warmedinger und N. Treptow, „Qualitätsmanagement in der Karosserieentwicklung durch integrierten Einsatz von CAD und Modelltechnik,“ VDI-Berichte Nr. 1264, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1996.
- [65] Y. Yan, „Complementing and Enhancing Definitions of Datums and Tolerances imposed by ISO Geometrical Product Specifications,“ 67th CIRP General Assembly - CMAG Meeting, 2017.

- [66] „RPS design of training material,“ [Online]. Available: <http://max.book118.com/html/2016/1215/72248553.shtm>. [Zugriff am 26 07 2017].
- [67] InnovMetric Software Inc. Polyworks Reference Guide Measurement and Verification Software, 2015.
- [68] GOM GmbH, GOM Messsoftware: RPS-Ausrichtung, Handbuch, 2011.
- [69] R. Schmitt, L. De Chiffre und E. Savio, „Metrology of freeform shaped parts,“ in *CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 56, Issue 2*, 810-835, 2007.
- [70] M. Petitcuenot, L. Pierre und B. Anselmetti, „ISO Specifications of Complex Surfaces: Application on Aerodynamic Profiles,“ in *13th CIRP conference on Computer Aided Tolerancing*, 2015.
- [71] Y. Li und P. Gu, „Free-form surface inspection techniques state of the art review,“ in *Computer-Aided Design*, 36:1395–1417, 2004.
- [72] L. Zhu, J. Barhak, V. Srivatsan und R. Zatz, „Efficient registration for precision inspection of freeform surfaces,“ in *International Journal of Advanced manufacturing Technology*, 32/5-6: 505-515, 2007.
- [73] J. Huang, Z. Wang, J. Gao und Y. Yu, „Overview on the profile measurement of turbine blade and its development,“ in *5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies (pp. 76560L-1-76560L-11)*. SPIE., 2010.
- [74] G. Budzik, K. Kubiak, P. Rokicki, T. Dziubek und A. Nowotnik, „Optical measurement of aircraft engine turbine blades,“ in *Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 20, No. 2.*, 2013.
- [75] Touch DMIS, One Touch Measurement, [Online]. Available: <http://support.perceptron.com/wp-content/uploads/TouchDMIS%20Help/TouchDMIS%205.2%20SP1%20User%20Guide%20word/Reference%20Point%20System%20Alignment.htm>. [Zugriff am 31 08 2017].
- [76] T. Korte, „3D-Koordinatenmesstechnik am Institut für Maschinenwesen,“ in *IMW - Institutsmitteilung Nr. 30, S. 59*, 2005.

- [77] K. Doytchinov, „Measurements of Free Form Surfaces and Best-fitting Measurements,“ in *Institute for National Measurement Standards, National Research Council Canada, Mexican CMM Club Meeting, VOLKSWAGEN de México (VWM)*, 2007.
- [78] Breitmeier Messtechnik GmbH, „Turbine Blade Measurement System,“ [Online]. Available: <http://www.breitmeier.de/en/products/specific-gauges/turbine-blade-measurement>. [Zugriff am 01 09 2017].
- [79] Nikon Metrology Inc. | America, „Turbine blade inspection,“ [Online]. Available: <https://www.nikonmetrology.com/en-us/industries/aerospace/turbine-blade-inspection>. [Zugriff am 01 09 2017].
- [80] Topmatika, „3D Measurement of Water Turbines,“ TOPOMATIKA 3D digitizing, optical measuring systems and services, [Online]. Available: <http://www.topomatika.hr/Applications/turbine-en.htm>. [Zugriff am 01 09 2017].
- [81] G. Budzik, „Geometrical Accuracy of Aircraft Engine Turbine Blades,“ in *Rzeszów*, 2013.
- [82] G. Amulele, A. Every und S. Yates, „Acoustic microscopy wall thickness measurements on nickel based superalloy gas turbine blades,“ in *Review a/Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Vol. 18 Edited by Thompson and Chimenti, Kluwer Academic/Plenum Publishers*, 1999.
- [83] N. Mannan, „3D Imaging of Turbine Blade for Comparative Deviation. Analysis between Ideal Part Designs to As Built Part,“ in *Master thesis, Rensselaer Polytechnic Institute Hartford, CT*, 2009.
- [84] M. Röding, „Best Fit in der Oberflächenmesstechnik,“ Springer-VDI-Verlag, VDI-Z Integrierte Produktion, 12 2016. [Online]. Available: <http://www.ingenieur.de/VDI-Z/2016/Ausgabe-12/Sonderteil-Qualitaetssicherung/Best-Fit-in-der-Oberflaechenmesstechnik>. [Zugriff am 01 09 2017].
- [85] N. Schuhmann, „Best Fit Matching von Punktwolken,“ in *Fraunhofer IPA Stuttgart, 7. Anwenderforum Rapid Product Development*, 2002.

- [86] S. Wasserman, „Geometric Dimensioning and Tolerance for Vestas Wind Turbines,“ 20 Februar 2014. [Online]. Available: <http://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/7185/Geometric-Dimensioning-and-Tolerance-for-Vestas-Wind-Turbines.aspx>. [Zugriff am 09 13 2017].
- [87] GOM GmbH, „Application Example: Quality Control. Turbines: Measuring Turbines with ATOS and TRITOP,“ in *Handbuch: Optical Measuring Techniques*, 2008.
- [88] J. Anders, J. Haarmeyer und H. Heukenkamp, „A Parametric Blade Design System (Part I + II),“ in *VKI LECTURE, BMWRolls-Royce GmbH, Dahlewitz, Germany*, 1998.
- [89] Z. Humienny, „State of art in standardization in GPS area,“ in *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 2*, 2009.
- [90] P. Bennich, „Intruduction of a new concept related to engineering drawing specification standards: chains of standards,“ in *Rapport ISO/TC 3 N516*, 1992.
- [91] P. Bennich, „Gaps and contradictions in ISO Geometrical Product Specification (GPS) Standards and ISO GPS chain of standrds,“ in *Rapport ISO/JHG, No.3*, 1993.
- [92] P. Bennich, „International Standards for design tolerancing review and future perspective,“ ISBN 978-1-4613-7656-9 Springer-science + business media B.V., 1998, pp. 31-52.
- [93] P. Bennich und H. Nielsen, *An overview of GPS*, 1st edition, © 2005 Institute for Geometrical Product Specifications, 2005.
- [94] Y. Hong und T. Chang, „A comprehensive review of tolerancing research,“ in *International Journal of Production Research*, 2010.
- [95] V. Srinivasan, „A geometrical product specification language based on a classification of symmetry groups,“ in *Computer-Aided Design 31*, S. 659–668, 1999.
- [96] Z. Prusak, „Introduction to Global Engineering: Use of Standards and Cultural Differences,“ in *36th ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference S3C-14*, San Diego, CA, 2006.

- [97] Z. Humienny und M. Berta, „A digital application for geometrical tolerancing concepts understanding,“ in *12th CIRP conference on Computer Aided Tolerancing Procedia CIRP 27 S. 264 – 269*, 2015.
- [98] V. Glukhov, „Geometrical product specifications: Alternative standardization principles, coordinate systems, models, classification and verification,“ in *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). S. 1-9*, 2014.
- [99] H. W. Grollius, *Technisches Zeichnen für Maschinenbauer*, ISBN: 9783446437036, Carl Hanser Verlag, 2013.
- [100] S. Filippi und I. Cristofolini, „The Design Guidelines (DGLs), a knowledge-based system for industrial design developed accordingly to ISO-GPS (Geometrical Product Specifications) concepts,“ in *Res Eng Design 18:1–19, Springer-Verlag London Limited*, 2007.
- [101] P. J. Scott, Q. Qi, X. Jiang und W. Lu, „A hierarchical category model for geometrical product specifications (GPS),“ in *14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (CAT)*, 2016.
- [102] B. M. Colosimo und N. Senin, *Geometric Tolerances, Impact on Product Design, Quality Inspection and Statistical Process Monitoring*, ISBN 9781849963107, Springer-Verlag-London, 2010.
- [103] A. Armillotta und Q. Semeraro, *Geometric Tolerance Specification*, ISBN 9781849963107, Springer London Dordrecht Heidelberg New York, 2010.
- [104] J. D. Meadows, „Geometric Dimensioning and Tolerancing,“ [Online]. Available: <http://geotolmeadows.com/index.htm>. [Zugriff am 27 07 2017].
- [105] G. Henzold, „Maß-, Form- und Lagetolerierung,“ Seminarunterlagen, 2011.
- [106] W. Jordan und W. Schütte, *Form- und Lagetoleranzen: Handbuch für Studium und Praxis*, ISBN: 9783446431997, Carl Hanser Verlag, 2012.
- [107] G. Henzold, „Principles for Tolerancing,“ in *Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection*, ISBN: 9780750667388, Elsevier Ltd., 2006, p. 6.

- [108] G. Henzold, Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection, A Handbook for Geometrical Product Specification using ISO and ASME Standards, Second Edition, ISBN: 9780750667388, Elsevier Ltd., 2006.
- [109] P. Green, The Geometrical Tolerancing Desk Reference. Creating and Interpreting ISO Standard Technical Drawings, ISBN: 9780750668217, Elsevier Ltd., 2005.
- [110] W. Jordan und W. Schütte, Form- und Lagetoleranzen: Handbuch für Studium und Praxis, ISBN: 9783446439856, Verlag: Carl Hanser Verlag, 2014.
- [111] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen und K. H. Grote, Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung, Ausgabe 8, ISBN 9783642295690, Verlag Springer-Verlag, 2007.
- [112] H. S. Nielsen, The ISO Geometrical Product Specifications Handbook - Find your way in GPS, 1. Auflage, ISO/Danish Standards, Beuth Verlag GmbH, 2012.
- [113] B. Klein, Toleranzmanagement im Maschinen- und Fahrzeugbau, München: ISBN 9783486712827, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2012.
- [114] C. H. Simmons, D. E. Maguire und N. Phelps, „Positional tolerancing,“ in *Manual of Engineering Drawing (Third Edition)* , ISBN: 9780750689854 , 2009.
- [115] H. Wittel, D. Muhs, D. Jannasch und J. Voßiek, Roloff/Matek Maschinenelemente, Normung, Berechnung, Gestaltung, ISBN: 9783658090814, Springer Fachmedien Wiesbaden , 2015.
- [116] W. Polini, „Geometric tolerance analysis,“ in *Geometric Tolerances, Impact on Product Design, Quality Inspection and Statistical Process Monitoring*, ISBN: 9781849963107, Springer-Verlag London, 2010, pp. 39-68.
- [117] C. H. Simmons, D. E. Maguire und N. Phelps, „Geometrical tolerancing and datums,“ in *Manual of Engineering Drawing (Third Edition)*, ISBN: 9780750689854 .
- [118] P. Leonard, E. Pairel und M. Giordano, „A Simpler and More Formal Geometric Tolerancing Model,“ in *12th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing*, Volume 10, S. 30-36, 2013.

- [119] R. Aristides, „Toward a Theory of Geometric Tolerancing,“ in *The International Journal of Robotics Research*, S. 45-60, 1983.
- [120] A. Ballu, L. Mathieu und J.-Y. Dantan, Global view of geometrical specifications, ISBN 9789048163427, Springer-Science + Business media, B.V. , 2001.
- [121] F. Charpentier, Leitfaden für die Anwendung der Normen zur geometrischen Produktspezifikation (GPS), ISBN: 9783410238058, Beuth Verlag GmbH, 2014.
- [122] F. van Houten und H. Kals, „Global Consistency of Tolerances,“ in *The 6th CIRP International Seminar on Computer-Aided Tolerancing*, 1999.
- [123] DMS GD&T Training, „Fundamentals of ISO GPS Dimensioning & Tolerancing,“ [Online]. Available: <http://www.dmsgdt.com/gdt-classes/iso-gps-fundamentals/>. [Zugriff am 27 07 2017].
- [124] J. D. Meadows, Geometric Dimensioning and Tolerancing: Applications and Techniques for Use in Design, manufacturing, and inspection, ISBN: 0824793099, New York , 1995.
- [125] T. H. Hopp, „The Mathematics of Datums,“ *ASPE Newsletter*, Nr. American Society for Precision Engineering, Raleigh, NC., September 1990.
- [126] W. Tandler, „All Those Datum Things,“ Smart GD&T workshop No. 5, Inside Metrology, Quality Digest, 2008. [Online]. Available: <https://www.qualitydigest.com/inside/metrology-column/all-those-datum-things.html>. [Zugriff am 28 07 2017].
- [127] P. Chiabert, F. Lombardi und M. Orlando, „Benefits of geometric dimensioning and tolerancing,“ in *Journal of Materials Processing Technology, Volume 78, Issues 1–3*, 29-35, 1998.
- [128] A. Clement, „The TTRSs: 13 Oriented constraints for dimensioning, tolerancing & inspection,“ in *Advanced Mathematical Tools in Metrology III, World Scientific Publishing Company*, 24-42, 1997.
- [129] R. Hillyard und I. C. Braid, „Analysis of dimensions and tolerances in computer-aided mechanical design,“ in *Computer-Aided Design, 10(3):161-166*, 1978.

- [130] L. Mathieu und A. Ballu, „GPS card": a tool for univocal expression of geometrical specifications,“ in *Proceedings of the 10th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, 1-10*, 2007.
- [131] X. Xu, „Study on the Theories and Methods of Functional Tolerancing Based on New GPS,“ in *Department of Mechanical Engineering, Zhejiang*, 2008.
- [132] X. Wang, C. Sun, Y. Yao und L. Liang, „Extension of the definition of tolerance and an application thereof in the calculation of dimension chains,“ in *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, S. 1069–10, 2014.
- [133] X. Zhang und U. Roy, „Criteria for Establishing Datums in Manufactured Parts,“ in *Journal of Manufacturing Systems*, 1993.
- [134] E. Umaras, M. de Sales und G. Tsuzuki, „Datum Features Specification: Considerations Regarding Capabilities of Manufacturing and Assembly Processes,“ in *SAE Technical paper*, 2011.
- [135] Y. Wu, „Assembly Tolerance Analysis Method Based on the Real Machine Model with Three Datum Planes Location,“ in *13th CIRP conference on Computer Aided Tolerancing*, 2015.
- [136] S. A. Tahan und S. Levesque, „Exploiting the Process Capability of Position Geometric Tolerance According GD&T ASME Y14.5M,“ in *Computers & Industrial Engineering*, 2009.
- [137] X. Zhang, X. Jiang und P. J. Scott, „A new free-form surface fitting method. for precision coordinate metrology,“ in *Wear* S. 543–547, 2009.
- [138] B. Kishor und B. Gurumoorthy, „Profile tolerance verification for free-form surfaces using Medial Axis Transform,“ in *12th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing*, S. 133–141, 2013.
- [139] J. S. Kim und H. G. Choi, „Surface Profile Tolerance Measuring Method using Kriging Method,“ in *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, S. 723-728, 2007.

- [140] P. Bo, M. Bartoň, D. Plakhotnik und H. Pottmann, „Towards efficient 5-axis flank CNC machining of free-form surfaces via fitting envelopes of surfaces of revolution,“ in *Computer-Aided Design*, Vol 79, S. 1-11, 2016.
- [141] A. Lang, Z. Song, G. He und Y. Sang, „Profile error evaluation of free-form surface using sequential quadratic programming algorithm,“ in *Precision Engineering*, Volume 47, S. 344-352, 2017.
- [142] Y. Li und P. Gu, „Free-form surface inspection techniques state of the art review,“ in *Computer-Aided Design* 36, S. 1395–1417, 2004.
- [143] X. Huang und Y. Xiong, „Profile tolerance evaluation of parametric curves and surfaces,“ in *Chinese J Mech Engng*, 15 (2), S. 121-125, 2002.
- [144] X. Jiang, P. Scott und D. Whitehouse, „Freeform Surface Characterisation - A Fresh Strategy,“ in *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 56, Issue 1, S. 553-556, 2007.
- [145] A. Mujezinovic, J. Davidson und J. Shah, „A new mathematical model for geometric tolerance as applied to polygonal faces,“ in *Journal of Mechanical Design*, 126(3):504-518, 2004.
- [146] J.-Y. Dantana, L. Mathieub, A. Balluc und P. Martina, „Tolerance synthesis: quantifier notion and virtual boundary,“ in *Computer-Aided Design* 37, S. 231–240, 2005.
- [147] U. Roy und B. Li, „Representation and interpretation of geometric tolerances for polyhedral objects. II. Size, orientation and position tolerances,“ in *Computer-Aided Design*, Volume 31, Issue 4, S. 273-285, 1999.
- [148] H. Peng, „Study on theory and methodology of tolerance design within the framework of the New generation GPS standards system,“ 2009.
- [149] C. M. Shakarjia und V. Srinivasanb, „Theory and algorithm for planar datum establishment using constrained total least-squares,“ in *14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (CAT)*, 2016.

- [150] C. Rastogi, R. Frutiger, P. Yoon und H. Lin, „Math Based Datum Selection and Optimization For Body Panels and Sub-Assemblies,“ in *SAE technical paper series 01-3065*, 2001.
- [151] W. Yuan, „Analytical Approach to the Robust Design of Dimensional Datum Schemes,“ in *SAE technical paper series, 01-0500*, 2006.
- [152] S. Gröger, „Funktionsgerechte Spezifikation geometrischer Eigenschaften mit dem System der Geometrischen Produktspezifikation und -verifikation,“ in *Habilitationsschrift*, 2013.
- [153] C. M. Shakarji und V. Srinivasan, „A constraint L2 based algorithm for standardized planar datum establishment,“ in *Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE2015, Houston, Texas.*, 2015.
- [154] C. M. Shakarji und V. Srinivasan, „Theory and Algorithms for L1 Fitting Used for Planar Datum Establishment,“ in *Proceedings of the ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2013 Portland, Oregon, USA*, 2013.
- [155] C. M. Shakarji und V. Srinivasan, „Theory and Algorithms for Weighted Total Least-Squares Fitting of Lines, Planes, and Parallel Planes to Support Tolerancing Standards,“ in *Computers and Information Division of ASME for publication in the Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2013.
- [156] C. Shakarji und V. Srinivasan, „Datum Planes Based on a Constrained L1 Norm,“ in *ASME Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 15 (4), 2015.
- [157] S. H. Cheraghi, W. Liu und G. Weheba, „An examination of the effect of variation in datum targets on part acceptance,“ in *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45, S. 1037–1046, 2005.
- [158] K. Sivakumar, C. Balamurugan, S. Ramabalan und S. B. Venkata Raman , „Optimal concurrent dimensional and geometrical tolerancing based on evolutionary algorithms,“ in *World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC)*, 2009.

- [159] X. Jiang, „Theory and Applications of New Generation Geometrical Product Specifications,“ in *Higher Education Press, Beijing*, 2007.
- [160] M. Giordano, E. Pairel und S. Samper, „Mathematical representation of tolerance zones,“ in *Proc. of the 6th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, University of Twente, Enschede. The Netherlands*, S. 177-186, 1999.
- [161] F. Bennis, L. Pinos und C. Fortin, „Analysis of positional tolerance based on the assembly,“ in *Proc. of CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, University of Twente, Netherlands*, 1999.
- [162] Y. Liu, „A Representation Method of 3D Tolerance Semantics Based on Mathematical Definition,“ in *China Mechanical Engineering, Vol.14, No.3, S. 241-245*, 2003.
- [163] J. B. Gou, Y. X. Chu und Z. X. Li, „A geometric theory for formulation and evaluation of form and profile tolerances,“ in *Volume 32, Issue 2, July 1999, S. 2119–2124*, 1999.
- [164] J. B. Guo, Y. X. Chu und Z. X. Li, „A geometric theory of form, profile, and orientation tolerances,“ in *Volume 23, Issue 2, April 1999, S. 79-93*, 1999.
- [165] S. H. Cheraghi, G. Jiang und J. S. Ahmad, „An efficient approach for the identification of candidate datum set for a nominally flat primary datum feature,“ in *International Journal of Machine Tools & Manufacture 43, S. 329–336*, 2003.
- [166] J. B. Gou, Y. X. Chu und Z. X. Li, „Geometric formulation of orientation tolerances,“ in *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 1998.
- [167] F. A. Etesmi, „Mathematical model for geometric tolerancing,“ in *Journal of Mechanical Design, 115(3): 81-86*, 1993.
- [168] J. U. Turner und M. J. Wozny, „A mathematical theory of tolerances,“ in *Geometric Modeling for CAD Applications, 163-187*, 1988.
- [169] K. Carr und P. Ferreira, „Verification of form tolerances, Part I: Basic issues, flatness and straightness,“ in *Precision Engineering, 17 (2) (1995), S. 131–143*, 1995.

- [170] K. Carr und P. Ferreira, „Verification of form tolerances, Part II: Cylindricity and straightness of a median line,“ in *Precision Engineering*, 17 (2), S. 144–156, 1995.
- [171] V. Bhat und E. C. De Meter, „An analysis of the effect of datum-establishment methods on the geometric errors of machined features,“ in *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40, S. 1951–1975, 2000.
- [172] F. Keller und M. Weißgerber, „Datum Systems in Coordinate Measuring Technique,“ in *XIth International Scientific Conference on Coordinate Measuring Technique CMT 2014, Bielsko-Biala, 978-83-63713-88-1*, S. 77-81, 2015.
- [173] A. Armillotta, „Tolerance analysis considering form errors in planar datum features,“ in *14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (CAT), Procedia CIRP* 43, S. 64 – 69, 2015.
- [174] J. Mao, Y. Cao und J. Yang, „Implementation uncertainty evaluation of cylindricity errors based on geometrical product specification (GPS),“ in *Measurement, Volume* 42, Issue 5, S. 742-747, 2015.
- [175] J. Yu, Z. Chen und J. Zepeng, „An approach for machining distortion measurements and evaluation of thin-walled blades with small datum,“ in *Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 29, Issue 6*, S. 1806-1814, 2016.
- [176] Y.-h. Sun, J. Zhang, M.-f. Huang, J.-t. Huang und L.-z. Xiao, „Plane to Plane Parallelism Error Evaluation Base on New Generation Geometrical Product Specification,“ in *Intelligent Computing and Integrated Systems (ICISS)*, 2010.
- [177] J. Wang, „Improved Geometrical Product Specification (GPS) Uncertainty Theory and Application,“ in *Huazhong University of Science and Technology, Wuhan*, 2006.
- [178] W. U. Yuguang und L. I. U. Yusheng, „DOF Representation and Operation of Geometric Feature and Its Applications for Tolerance Technology,“ in *China Mechanical Engineering*, 26 (11), S. 1509-1515, 2015.
- [179] X. D. Zhang, C. Zhang, B. Wang und S. C. Feng, „Unified functional tolerancing approach for precision cylindrical components,“ in *International Journal of Production Research, Vol. 43, No. 1*, S. 25-47, 2007.

- [180] E. A. Lehtihet, N. U. Gunasena und A. Clement, „On the Composite Position Tolerance for Patterns of Holes,“ in *CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 40, Issue 1, S. 495-498*, 1991.
- [181] J. K. Davidson, A. Mujezinovic und J. J. Shah, „A new mathematical model for geometric tolerance as applied to round faces,“ in *SME Journal of Mechanical Design, (124): 609-622*, 2002.
- [182] M. Dowling, P. Griffin, K. Tsui und C. Zhou, „Statistical issues in geometric feature inspection using coordinate measuring machines,“ in *Technometrics, (39):3-17*, 1997.
- [183] Internationaler Standard Organisation, DIN EN ISO 17450-1, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen – Teil 1: Modell für die geometrische Spezifikation und Prüfung, 2012.
- [184] Internationaler Standard Organisation, DIN EN ISO 14405-1, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Dimensionelle Tolerierung – Teil 1: Lineare Größenmaße, 2017.
- [185] Internationaler Standard Organisation, DIN EN ISO 14405-2, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Dimensionelle Tolerierung – Teil 2: Andere als lineare Maße, 2012.
- [186] Internationaler Standard Organisation, DIN ISO 22514-2, Statistische Verfahren im Prozessmanagement – Fähigkeit und Leistung – Teil 2: Prozessleistungs- und Prozessfähigkeitskenngrößen von zeitabhängigen Prozessmodellen, 2015.
- [187] Internationaler Standard Organisation, DIN ISO 22514-1, Statistische Methoden im Prozessmanagement – Fähigkeit und Leistung – Teil 1: Allgemeine Grundsätze und Begriffe, 2016.
- [188] Internationaler Standard Organisation, DIN EN ISO 14253-1 (Entwurf), Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen – Teil 1: Entscheidungsregeln für den Nachweis von Konformität oder Nichtkonformität mit Spezifikationen, 2016.

- [189] Internationaler Standard Organisation, DIN EN ISO 17450-2, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen – Teil 2: Grundsätze, Spezifikationen, Operatoren, Unsicherheiten und Mehrdeutigkeiten, 2013.
- [190] Internationaler Standard Organisation, DIN EN ISO 16610-1, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 1: Überblick und grundlegende Konzepte, 2015.
- [191] Internationaler Standard Organisation, ISO 16610-2, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Datenerfassung durch Abtasten und Filtern Teil 2: Grundlagen linearer Profilfilter, 2001.
- [192] Internationaler Standard Organisation, DIN EN ISO 22432, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Zur Spezifikation und Prüfung benutzte Geometrielemente, 2012.
- [193] Internationaler Standard Organisation, DIN EN ISO 10579, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Bemaßung und Tolerierung – Nicht-formstabile Teile, 2013.
- [194] M. Do Carmo, *Differential Geometry of Curves and Surfaces*, Mineola, New York: Dover publications, Inc., 1976.
- [195] M. I. Sarigecili, U. Roya und S. Rachuri, „Interpreting the semantics of GD&T specifications of a product for tolerance analysis,“ in *Computer-Aided Design* 47, S. 72-84, 2014.
- [196] B. Anselmetti, „Generation of functional tolerancing based on positioning features,“ in *Computer-Aided Design* 38, Volume 38, Issue 8, S. 902-919, 2006.
- [197] F. Zhao, K. Zhang, L. Zhang und P. Zheng, „Research on the Intelligent Annotation Technology of Geometrical Tolerance Based on Geometrical Product Specification (GPS),“ in *13th CIRP conference on Computer Aided Tolerancing*, S. 254-256, 2015.
- [198] B. Anselmetti und H. Louati, „Generation of manufacturing tolerancing with ISO standards,“ in *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45, S. 1124–1131, 2005.

- [199] H. Meijbri, B. Anselmetti und K. Mawussi, „Functional tolerancing of complex mechanisms: Identification and specification of key parts,“ in *Computer & Industrial Engineering, Vol. 49, Issue 2, S. 241-265.*, 2005.
- [200] M. Weißgerber, M. Ebermann, S. Gröger und E. Leidich, „Requirements for Datum Systems in Computer Aided Tolerancing and the Verification Process,“ in *14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (CAT) Procedia CIRP 43, S. 238 – 243*, 2016.
- [201] B. Anselmetti, R. Chavanne, J.-X. Yang und N. Anwer, „Quick GPS: A new CAT system for single-part tolerancing,“ in *Computer-Aided Design 42, S. 768 780*, 2010.
- [202] M. Ebermann, E. Leidich und S. Gröger, „Integration of GPS into the methodical engineering process,“ in *Conference “Entwerfen, Entwickeln, Erleben”*; Dresden, S. 383-395, 2014.
- [203] A. Geis, S. Husung, A. Oberänder, C. Weber und J. Adam, „Use of vectorial tolerances for direct representation and analysis in CAD-systems,“ in *13th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, Procedia CIRP 27, S. 230 – 240*, 2015.
- [204] C. H. Simmons, D. E. Maguire und N. Phelps, „3D annotation,“ in *Manual of Engineering Drawing (Third Edition)*, ISBN: 9780750689854, © Butterworth-Heinemann , 2009.
- [205] D. Teissandier, Y. Couétard und A. Gérard, „A computer aided tolerancing model: proportioned assembly clearance volume,“ in *Computer-Aided Design 31, S. 805–817*, 2000.
- [206] A. Ballu, H. Falgarone, N. Chevassus und L. Mathieu, „A new Design Method based on Functions and Tolerance Specifications for Product Modelling,“ in *CIRP Annals - Manufacturing Technology, S. 139-214*, 2006.
- [207] A. Weckenmann und G. Akkasoglu, „Methodic Design of a Customized Maturity Model for Geometrical Tolerancing,“ in *12th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, Procedia CIRP 10, S. 119 – 124*, 2013.

- [208] S. Xu und J. Keyser, „Statistical geometric computation on tolerances for dimensioning,“ in *Computer-Aided Design, Volume 70*, S. 193-201, 2016.
- [209] A. Armillotta, „A method for computer-aided specification of geometric tolerances,“ in *Computer-Aided Design 45, Volume 45, Issue 12*, S. 1604–1616, 2013.
- [210] G. Moroni, S. Petro und W. Polini, „Geometrical product specification and verification in additive manufacturing,“ in *CIRP Annals - Manufacturing Technology 66*, S. 157–160, 2017.
- [211] S. Jin, h. Chen, Z. Li und X. Lai, „A comprehensive study of three dimensional tolerance analysis methods,“ in *Computer-Aided Design, Volume 53*, S. 1-13, 2013.
- [212] B. Anselmettia und L. Pierreb, „Complementary writing of maximum and least material requirements, with an extension to complex surfaces,“ in *14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (CAT), Procedia CIRP 43*, S. 220 – 225, 2016.
- [213] A. Ballu und L. Mathieu, „A common language for Geometrical Product Specification and Verification to express method uncertainty,“ in *Proceedings of the 8th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Charlotte, USA*, 2003.
- [214] X. Li, M. Huang, K. Bing, Q. Wang und J. Bao, „Specification Design of Planar Feature Based on the New Generation Geometrical Product Specification and Verification,“ in *The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, 2009.
- [215] J. Mei, H. C. Zhang und W. J. Oldham, „A neural network approach for datum selection in computer-aided process planning,“ in *Computers in Industry, Volume 27, Issue 1*, P. 53-64, 1995.
- [216] U. Roy und Y. Xu, „Form and Orientation tolerance analysis for cylindrical surface in computer-aided inspection,“ in *Computers in Industry, Volume 26, Issue 2*, S. 127-134, 1995.
- [217] E. Umaras und M. de Sales Guerra Tsuzuki, „Design Considerations on Optimum Application of Geometric Dimensioning and Tolerancing,“ in *ISSN: 01487191, Society of Automotive Engineers, Inc.*, 2007.

- [218] M. Zhang, Discrete Shape Modeling for Geometrical Product Specifications: Contributions and Applications to Skin Model Simulation, Ph.D. Thesis, Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée, 2011.
- [219] A. Ballu und L. Mathieu, „Univocal expression of functional and geometrical tolerances for design, manufacturing and inspection,“ in *Computer Aided Tolerancing, 4th CIRP Seminar, Japan, 31-46*, 1995.
- [220] A. Clement, A. Desrochers und A. Riviere, „Theory and practice of 3D tolerancing for assembly,“ in *CIRP seminar on Computer aided tolerancing, Penn State University, USA*, 1991.
- [221] A. Clement und A. Riviere, „Tolerancing versus nominal modeling in next generation CAD/CAM system,“ in *CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, ENS Cachan, Paris, 97-113*, 1993.
- [222] O. W. Salomons, H. J. Jonge Poerink und F. J. Haalboom, „A computer aided tolerancing tool I: Tolerance specification,“ in *Computers in Industry 31 :161-174*, 1996.
- [223] J. Shah, Y. Yan und B. Zhang, „Dimension and tolerance modeling and transformations in feature based design and manufacturing,“ in *Journal of Intelligent Manufacturing, 9(5):475-488*, 1998.
- [224] T. Tech, A. Senthil-Kumar und V. Subramanian, „A CAD integrated analysis of flatness in a form tolerance zone,“ in *Computer-Aided-Design, (33):853-865*, 2001.
- [225] J. U. Turner, „Tolerances in computer-aided geometric design,“ in *Rensselaer Polytechnic Insititute, Troy*, 1987.
- [226] Internationaler Standard Organisation, DIN EN ISO 14660-1, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrieelemente Teil 1: Grundbegriffe und Definitionen, 1999.
- [227] ArcGIS Developer Help (Geometry), „esriGeometryDimension Constants,“ The topological dimension of a geometry, [Online]. Available:

- <http://edndoc.esri.com/arcobjects/9.0/ComponentHelp/esriGeometry/esriGeometryDimension.htm>. [Zugriff am 07 08 2017].
- [228] Y. Yan und M. Bohn, „Datum and datum system for complex component,“ in *19th Asia Pacific Automotive Engineering Conference and 2017 SAE-China Congress & Exhibition (APAC 19 & 2017 SAECCCE)*, Shanghai, 2017.
- [229] Mathematische Hintergründe math online, „Rechnen mit Vektoren, Addieren von Vektoren,“ [Online]. Available: <http://www.mathe-online.at/materialien/ursl/files/Rechnen.html>. [Zugriff am 07 08 2017].
- [230] Matheretter, „VEK03: Vektoraddition,“ [Online]. Available: <https://www.matheretter.de/vektoren/vektoraddition>. [Zugriff am 07 08 2017].
- [231] Developer Network, „3D Coordinate Systems and Geometry, Face and Vertex Normal Vectors,“ [Online]. Available: [https://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb324491\(VS.85\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb324491(VS.85).aspx). [Zugriff am 07 08 2017].
- [232] H. Wilhelm Alt, *Lineare Funktionalanalysis: Eine anwendungsorientierte Einführung*, ISBN: 9783642222603, Springer-Lehrbuch Masterclass, 2012.
- [233] A. Beutelspacher, *Lineare Algebra - Eine Einführung in die Wissenschaft der Vektoren, Abbildungen und Matrizen*, ISBN: 9783658024123, 8. Auflage Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [234] D. Werner, *Funktionalanalysis*, ISBN: 9783642210167, Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [235] Y. Yan und M. Bohn, „Limitations in Primary Datum Plane Establishment Imposed by ISO Standard and a Proposal for an Improved Methodology,“ in *11th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 19-21 July 2017, Gulf of Naples, Italy*, 2018.
- [236] Deutsches Institut für Normung, *DIN 416-11, Technische Zeichnungen - Maßeintragung Teil 11: Grundlagen der Anwendung*, 1992.

- [237] Deutsches Institut für Normung , DIN 416-12, Technische Zeichnungen - Maßeintragung Teil 12: Eintragung von Toleranzen für Längen- und Winkelmaßen, 1992.
- [238] Internationaler Standard Organisation, ISO 129-1, Technische Zeichnungen Eintragung von Maßen und Toleranzen Teil 1: Allgemeine Grundlagen, 1999.
- [239] Y. Yan und M. Bohn, „Limitations of notation system in centred part alignment accuracy imposed by ISO standard and proposal for an improved methodology,“ in *Journal of Machine Engineering, Vol. 17, No. 2.*, 2017.
- [240] M. Bohn, „Toleranzmanagement im Entwicklungsprozess: Reduzierung der Auswirkungen von Toleranzen auf Zusammenbauten der Automobil-Karosserien,“ in *Institut für Produktionstechnik (WBK), Karlsruhe* , 1998.
- [241] Y. Yan und M. Bohn, „Enhanced Definition and Required Examples of Common Datum Imposed by ISO Standard,“ in *ISMDMA, International Symposium on Mechanical Design, Manufacture and Automation* , Dubai, 2017 .
- [242] „Messelemente: Taster für Messmaschinen,“ dk Fixiersysteme GmbH & Co. KG, 02 2017. [Online]. Available: http://www.dk-fixiersysteme.de/wp-content/uploads/2017/06/2017_03-Messtaster-Katalog_Print24.pdf. [Zugriff am 07 12 2017].
- [243] P. Bauer, Grundlagen und Geräte der technischen Bohrungsmessung, Springer International Publishing AG, 1976.
- [244] „Tastereinsätze für taktile Messtaster,“ Renishaw plc., 03 2017. [Online]. Available: <http://www.renishaw.de/de/tastereinsaetze-fuer-taktile-messtaster--6333>. [Zugriff am 07 12 2017].
- [245] Y. Yan, M. Bohn, D. Schäfer und U. Heisel, „Neue Systematik zur Linienprofilltoleranz,“ in *wt Werkstattstechnik online. Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf*, 2017.
- [246] H. Kugler, Umformen metallischer Konstruktionswerkstoffe, Carl Hanser Verlag, ISBN: 978-3-4464-2222-3, 2009.

- [247] B. Awiszus, J. Bast, H. Dürr und P. Mayr, Grundlagen der Fertigungstechnik, Carl Hanser Verlag, ISBN: 978-3-4464-4821-6, 2016.
- [248] G. Schulze und A. H. Fritz, Fertigungstechnik, Springer-Lehrbuch, ISBN: 978-3-662-46554-7, 2015.
- [249] Internationaler Standard Organisation, DIN ISO 13715, Technische Zeichnungen Werkstückkanten mit unbestimmter Form Begriff und Zeichnungsangaben, 2000.
- [250] Y. Yan und M. Bohn, „Complementing and enhancing definitions of line profile composite tolerance imposed by ISO Geometrical Product Specification,“ in *Journal of Machine Engineering*, 2018, Vol. 18, No. 2, 74-84, Karpacz, Polen, 2018.
- [251] Y. Yan, M. Bohn, S. Peters und U. Heisel, „Complementing and enhancing definitions of position tolerance for a real point based on ISO Geometrical Product Specifications (GPS),“ in *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, CIRP, General Assembly Tokio, 2018.
- [252] Y. Yan und M. Bohn, „Complements and Enhancements of Position Tolerance for Axis and Derived Line Imposed by ISO Standards,“ in *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research IJMERR*, Singapore, 2018.
- [253] GOM GmbH, „Präzise industrielle 3D-Messtechnik,“ GOM GmbH, [Online]. Available: <http://www.gom.com/de/index.html>. [Zugriff am 05 01 2018].
- [254] GOM GmbH, „GOM Inspect Download,“ GOM GmbH, Präzise industrielle 3D-Messtechnik, [Online]. Available: <http://www.gom.com/de/3d-software/gom-inspect/download.html>. [Zugriff am 05 01 2018].
- [255] Internationaler Standard Organisation, „ISO / TR 14638, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Matrix Modell,“ 1995.

12 Anhang

Globale GPS-Normen						
Matrix allgemeiner GPS-Normen						
Kettenglieder	1	2	3	4	5	6
Größenmaßelement	X	X	X	X	X	X
Abstand	X	X	X	X	X	X
Radius	X	X	X	X	X	X
Winkel	X	X	X	X	X	X
Form einer bezugsunabhängigen Linie	X	X	X	X	X	X
Form einer bezugsabhängigen Linie	X	X	X	X	X	X
Form einer bezugsunabhängigen Oberfläche	X	X	X	X	X	X
Form einer bezugsabhängigen Oberfläche	X	X	X	X	X	X
Richtung	X	X	X	X	X	X
Lage	X	X	X	X	X	X
Lauf	X	X	X	X	X	X
Gesamtlauf	X	X	X	X	X	X
Bezüge	X	X	X	X	X	X
Rauheitsprofil	X	X	X	X	X	X
Welligkeitsprofil	X	X	X	X	X	X
Primärprofil	X	X	X	X	X	X
Oberflächenunvollkommenheit	X	X	X	X	X	X
Kanten	X	X	X	X	X	X

Tabelle 14 ISO GPS-Matrix-Modell [18, 7, 255]

	Kettenglieder						
	A	B	C	D	E	F	G
	Symbole und Angaben	Anforderungen an Geometrielemente	Merkmale von Geometrielementen	Übereinstimmung und Nicht-Übereinstimmung	Messung	Messgeräte	Kalibrierung
Größenmaß							
Abstand							
Form							
Richtung							
Ort							
Lauf							
Oberflächenbeschaffenheit: Profil							
Oberflächenbeschaffenheit: Fläche							
Oberflächenunvollkommenheit							

Tabelle 15 Bedeutung der Kettenglieder in ISO GPS-Matrix-Modell [18, 7, 255]

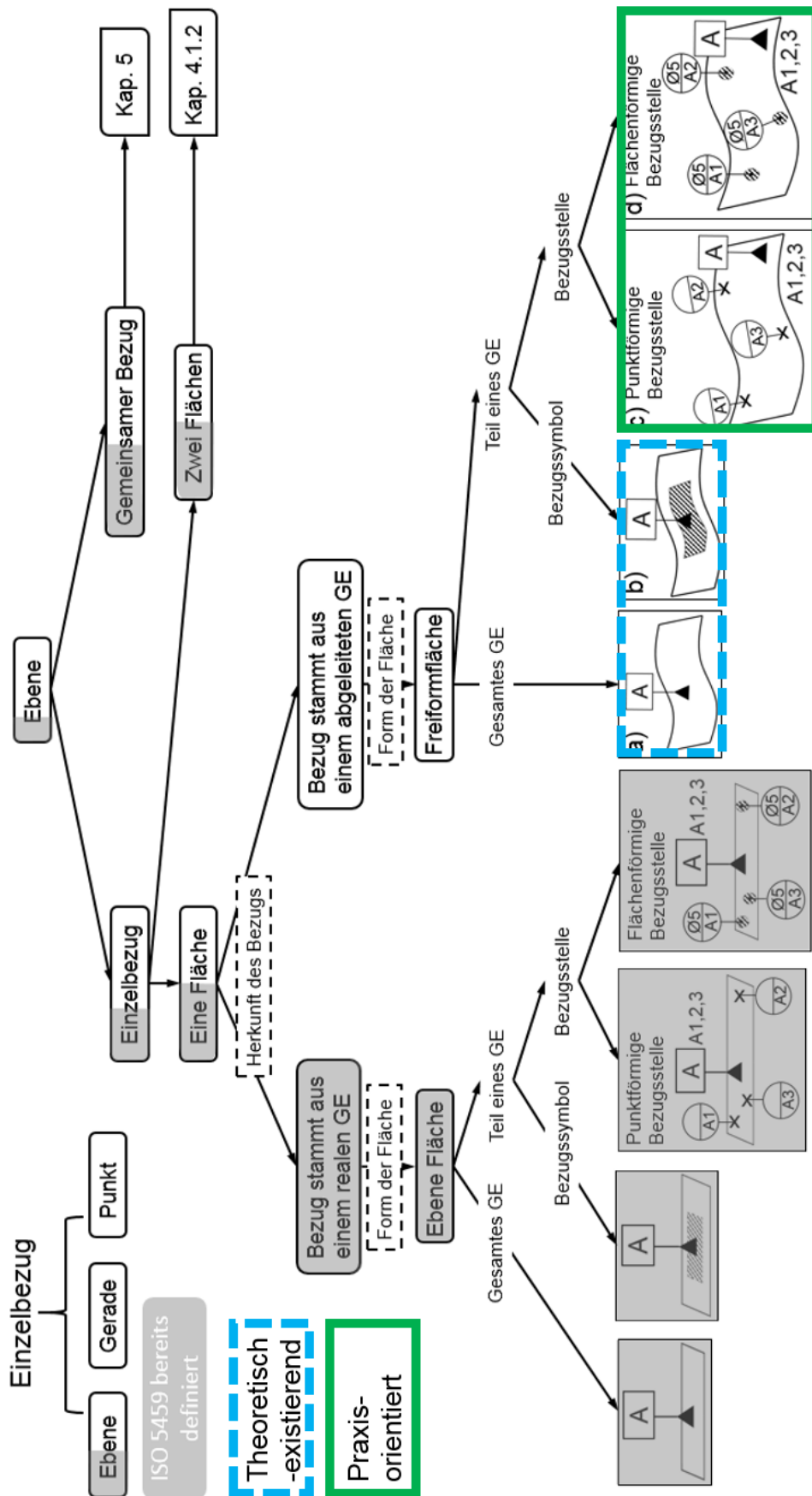


Bild 115 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Ebene aus einer Fläche als Bezug

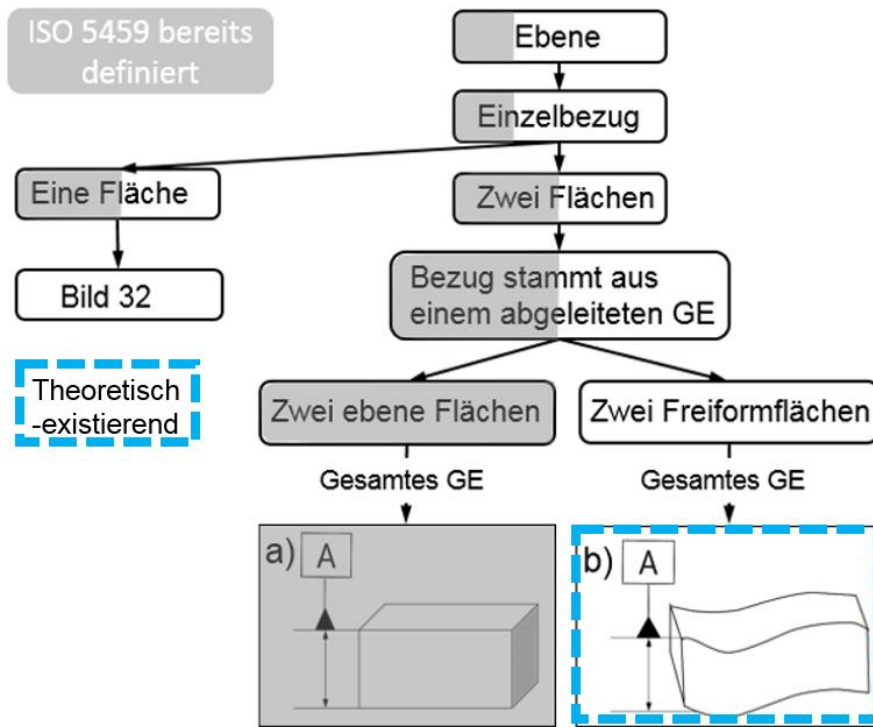


Bild 116 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Ebene aus zwei Flächen als Bezug

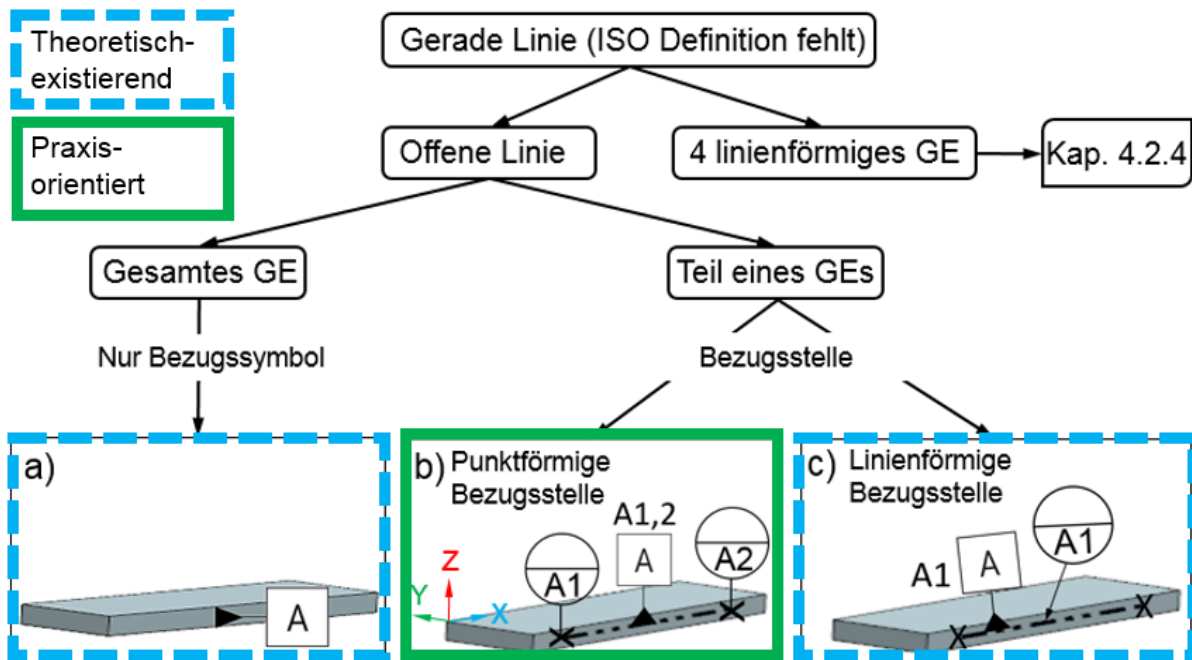


Bild 117 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Gerade aus gerader Linie als Bezug

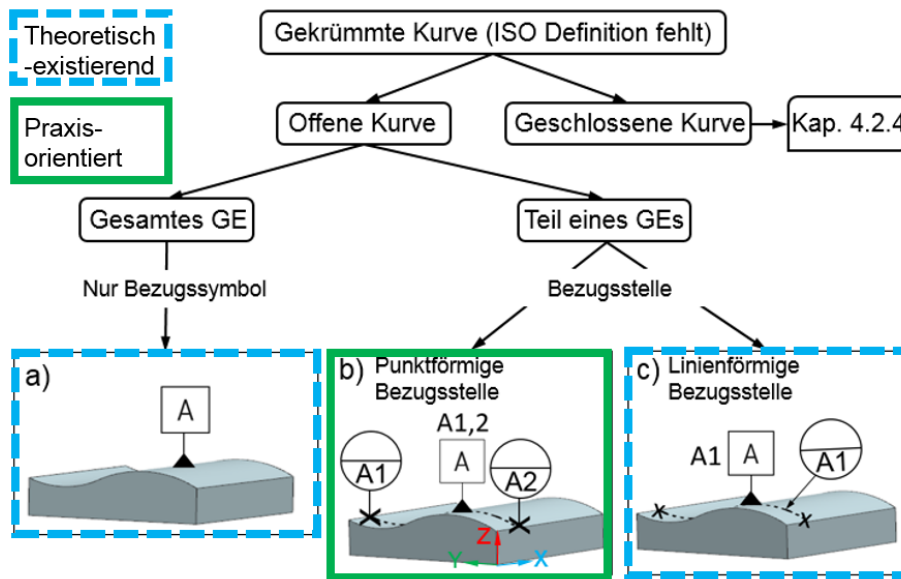


Bild 118 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Gerade aus gekrümmter Kurve als Bezug

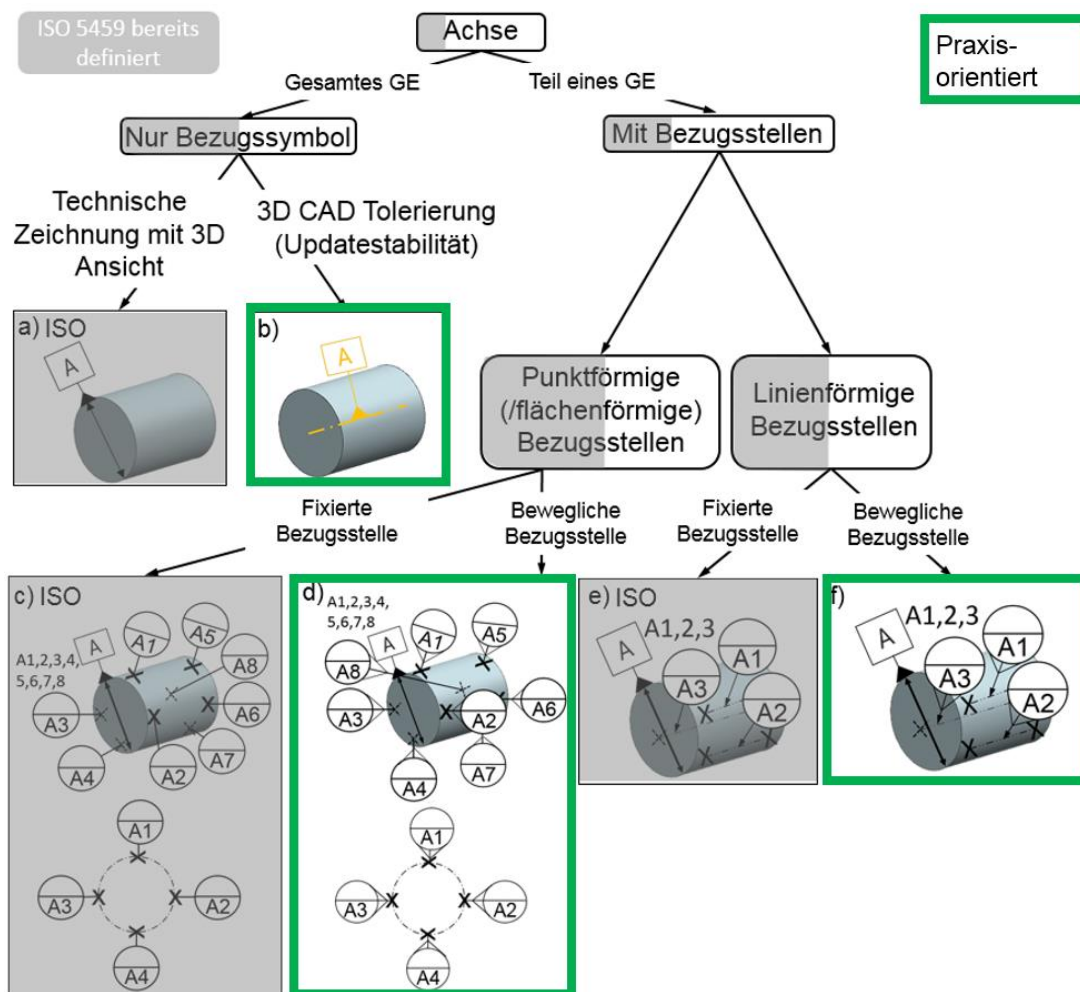


Bild 119 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Achse als Bezug

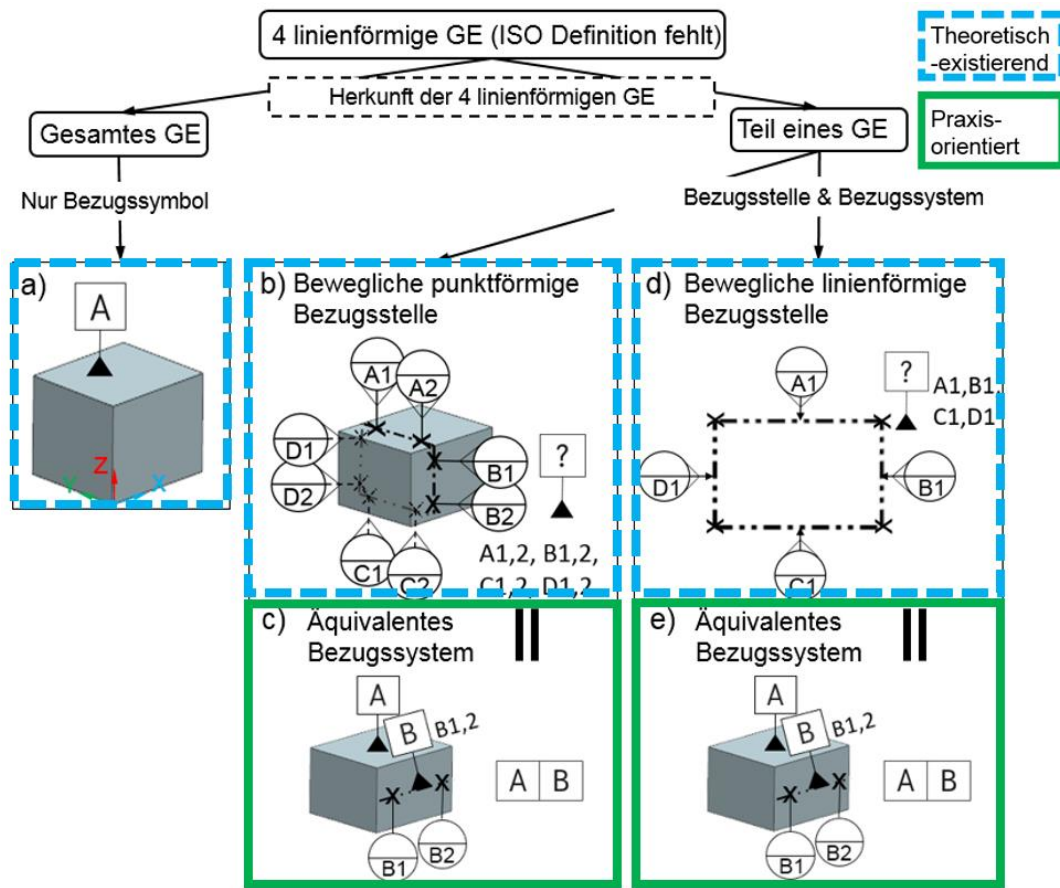


Bild 120 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Gerade aus vier linienförmigen GE als Bezug

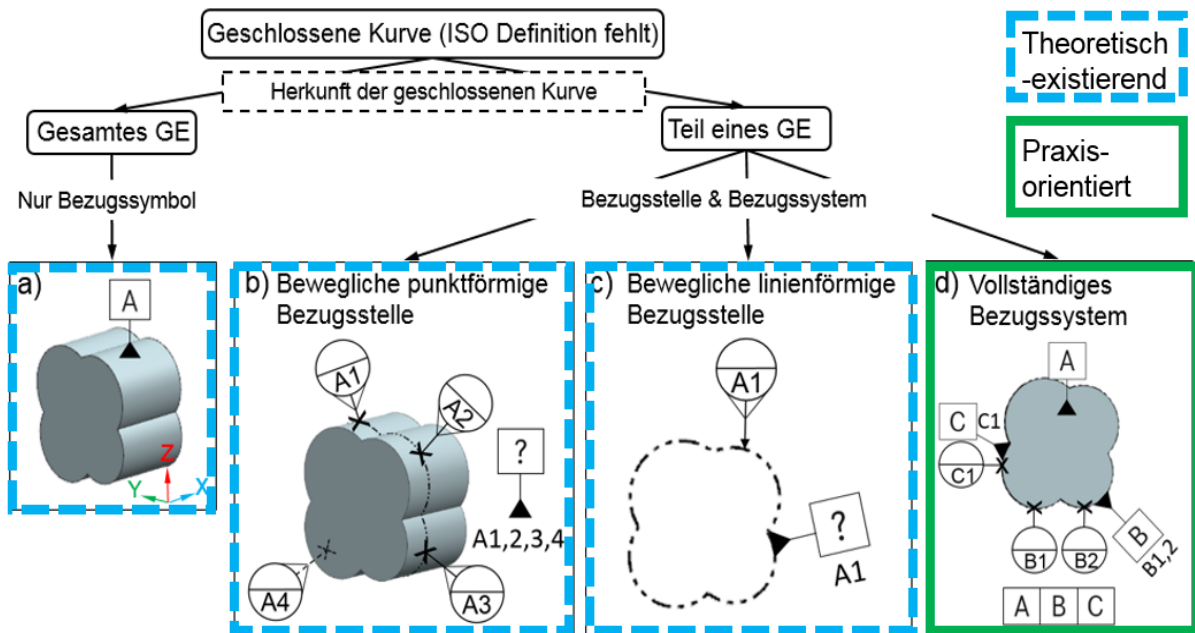


Bild 121 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Gerade aus geschlossener Kurve als Bezug

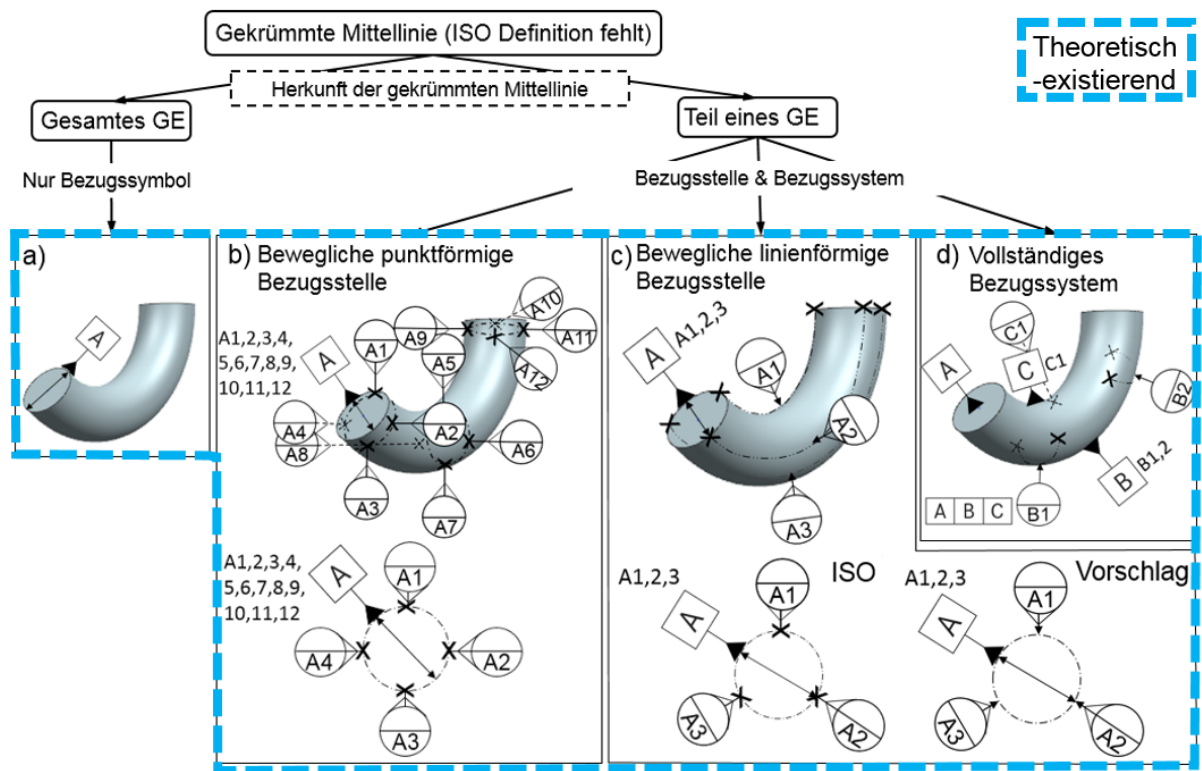


Bild 122 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Gerade aus gekrümmter Mittellinie als Bezug

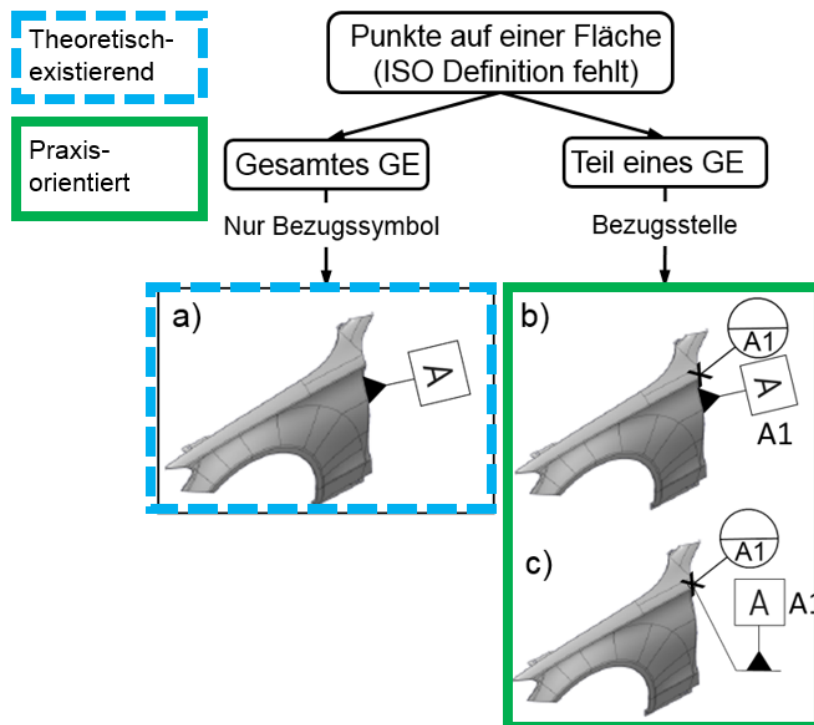


Bild 123 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Punkt aus realer Fläche als Bezug

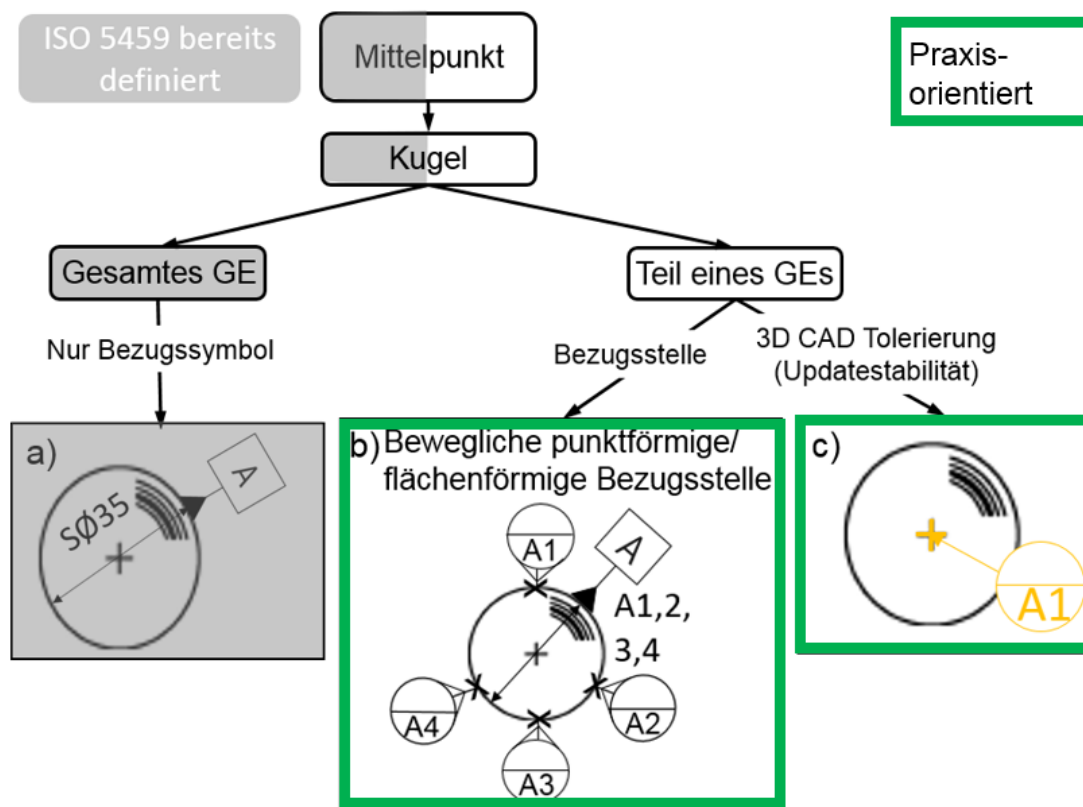


Bild 124 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Mittelpunkt als Bezug

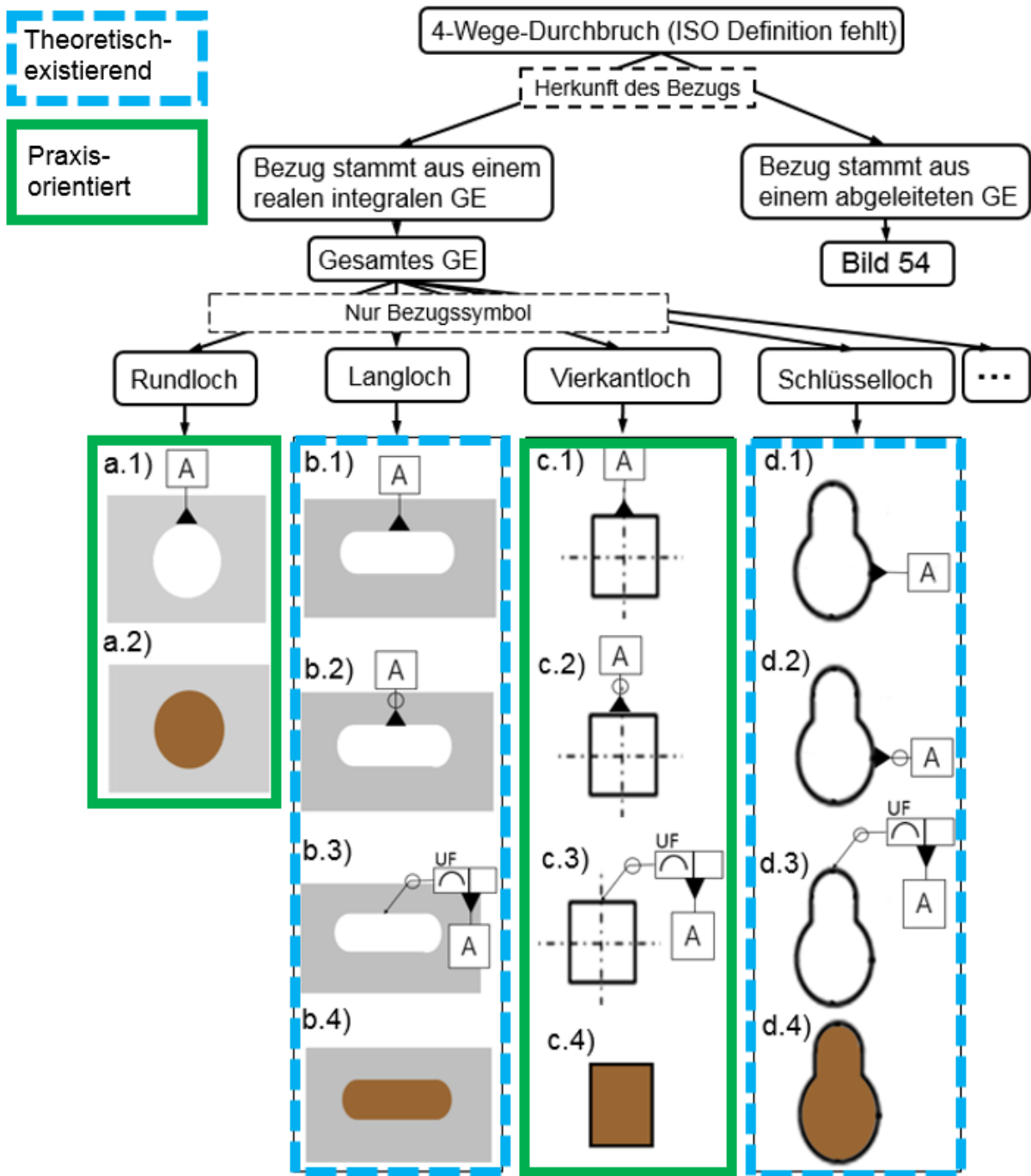


Bild 125 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Bezug für 4-Wege-Durchbrüche aus einem realen integralen GE

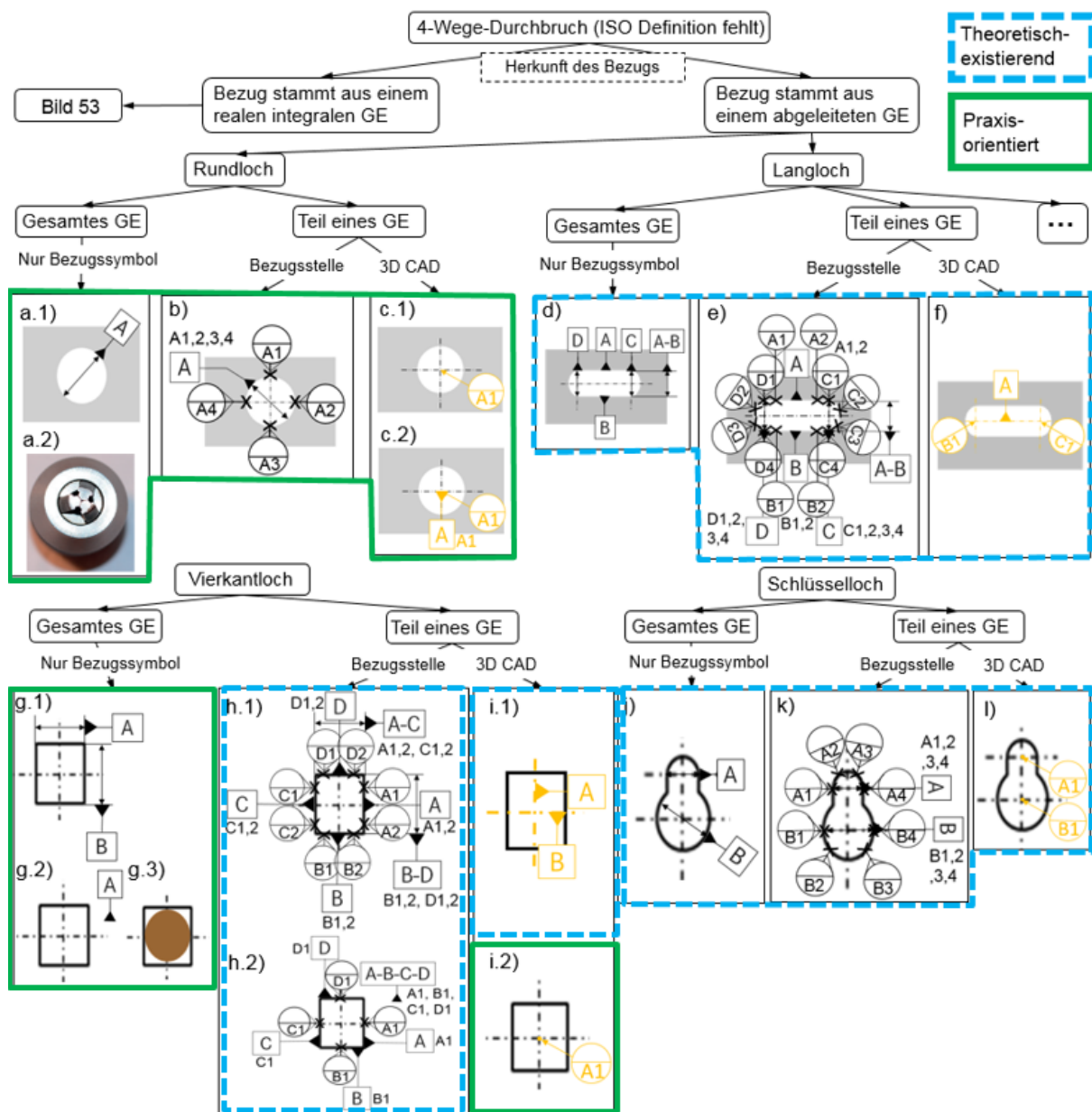


Bild 126 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Bezug für 4-Wege-Durchbrüche aus einem abgeleiteten GE

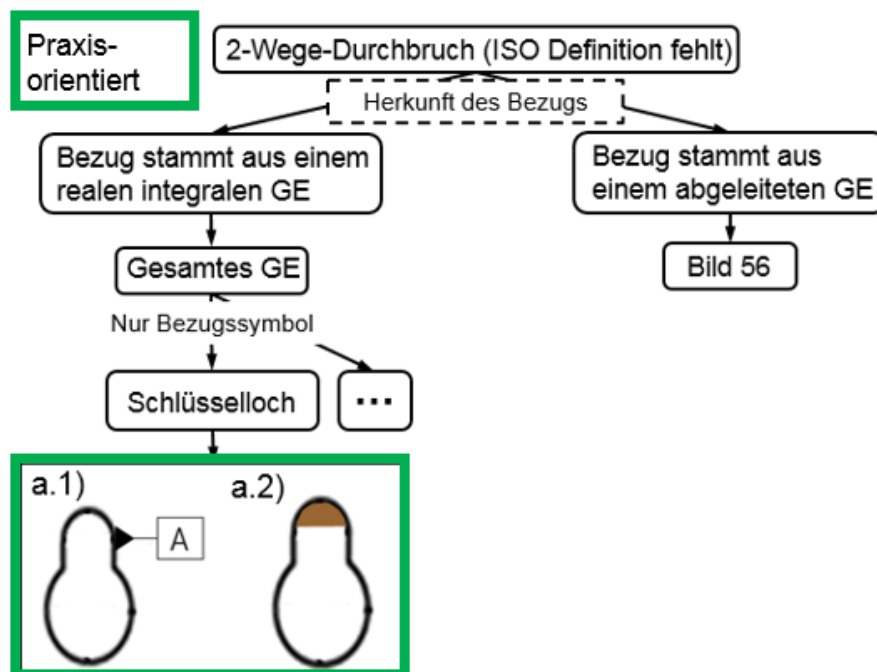


Bild 127 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Bezug für 2-Wege-Durchbrüche aus einem realen integralen GE

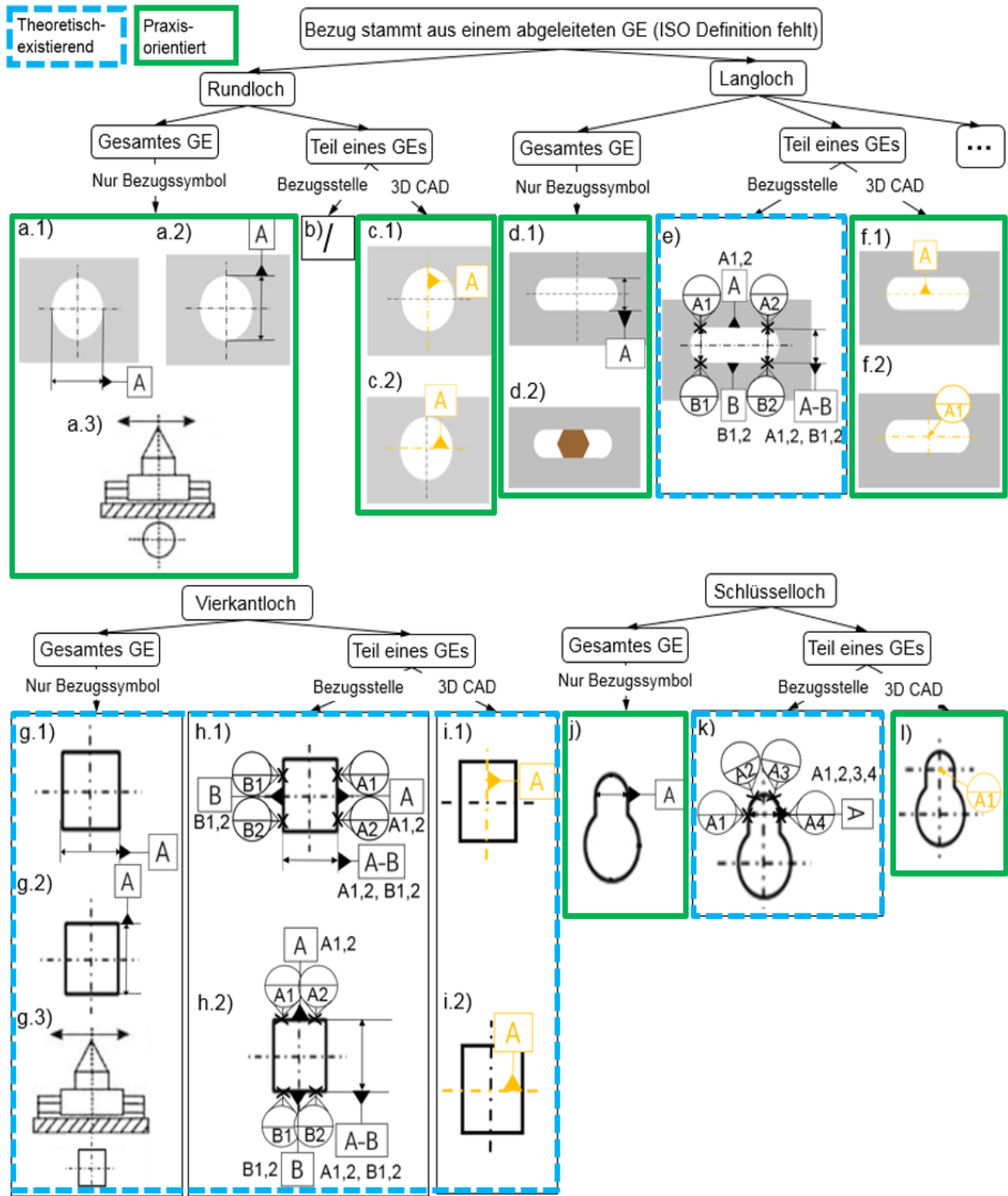


Bild 128 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Bezug für 2-Wege-Durchbrüche aus einem abgeleiteten GE

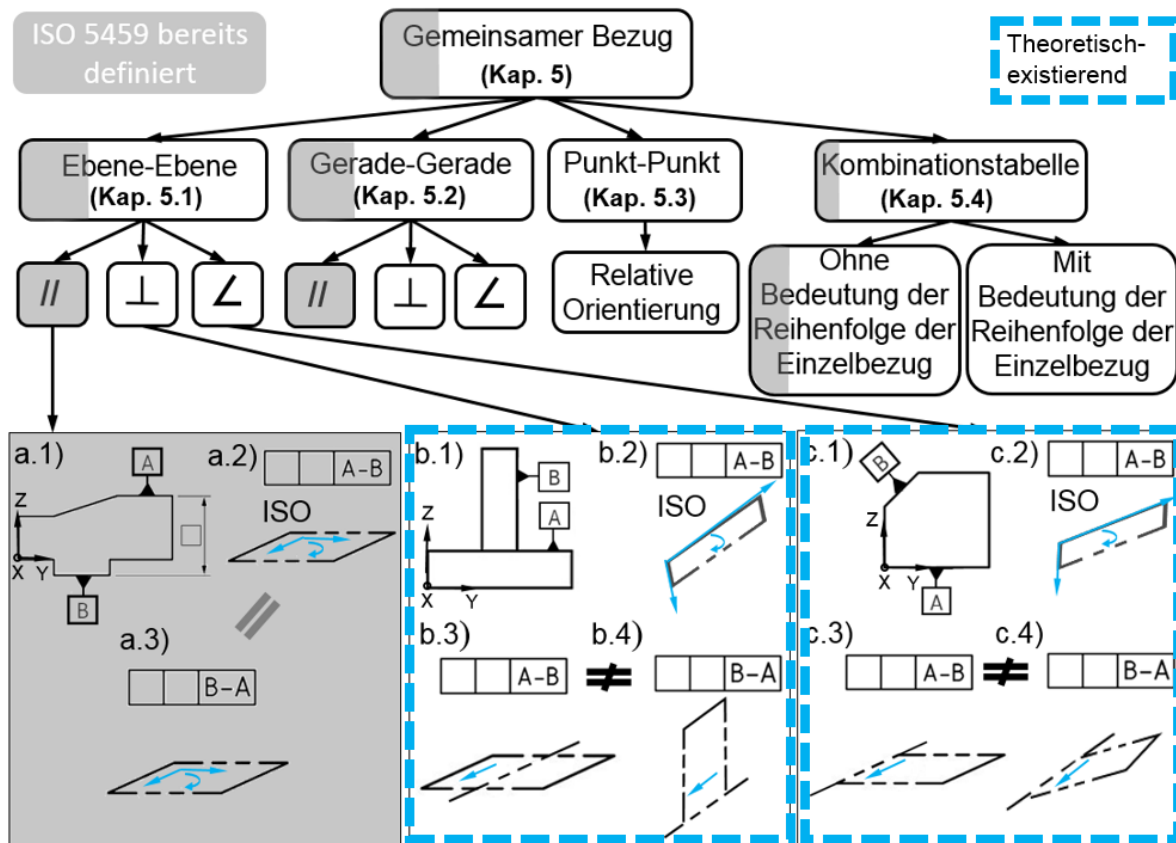


Bild 129 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Ebene-Ebene als gemeinsamer Bezug

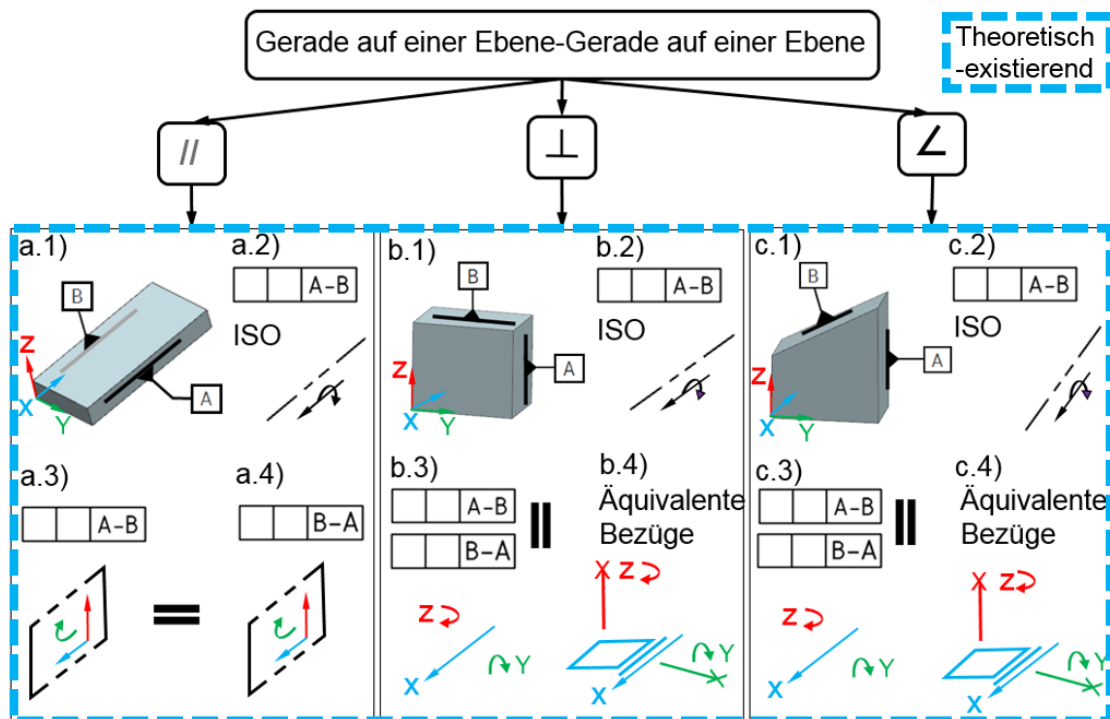


Bild 130 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Gerade auf einer Ebene-Gerade auf einer Ebene als gemeinsamer Bezug

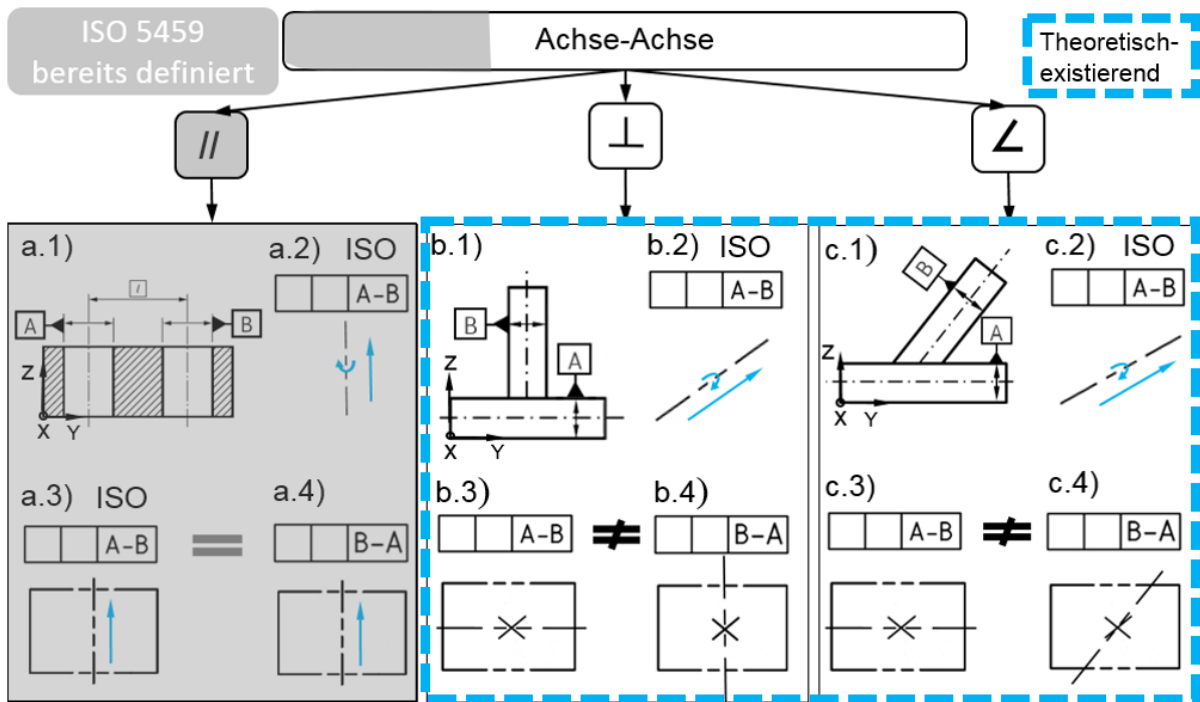


Bild 131 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Achse-Achse als gemeinsamer Bezug

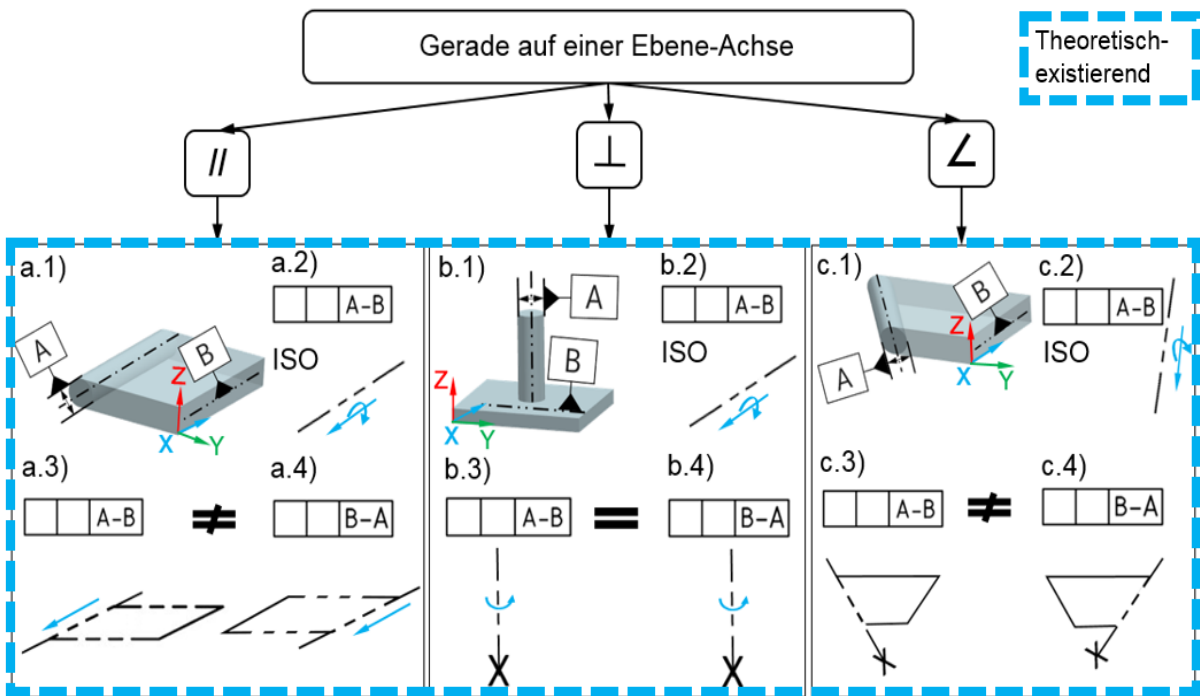


Bild 132 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Gerade auf einer Ebene-Achse als gemeinsamer Bezug

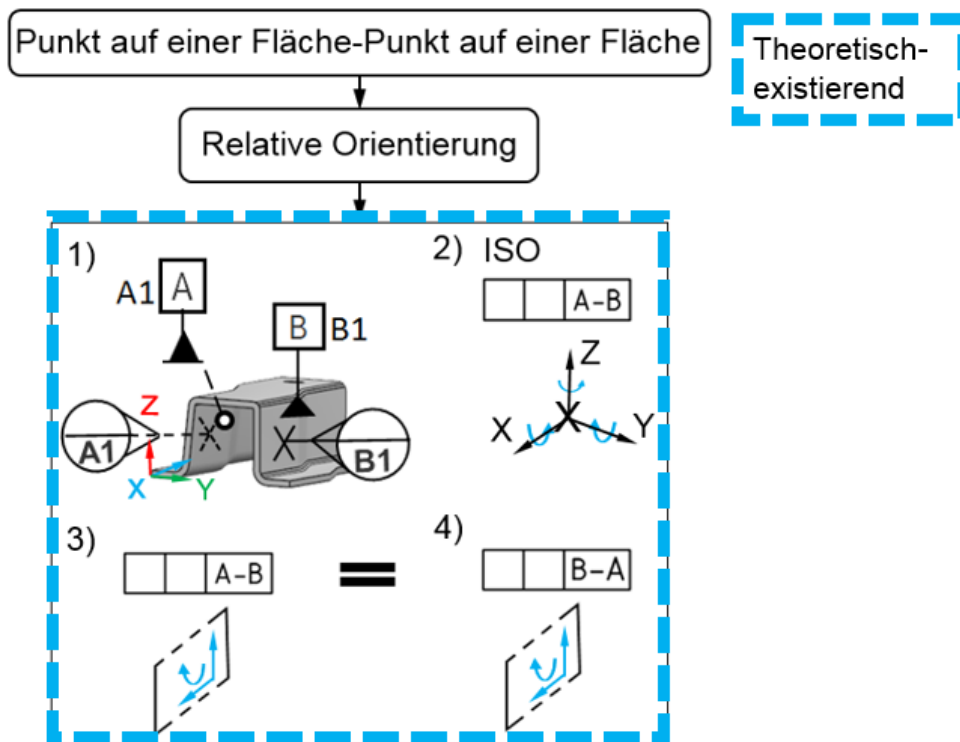


Bild 133 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Punkt auf einer Fläche- Punkt auf einer Fläche als gemeinsamer Bezug

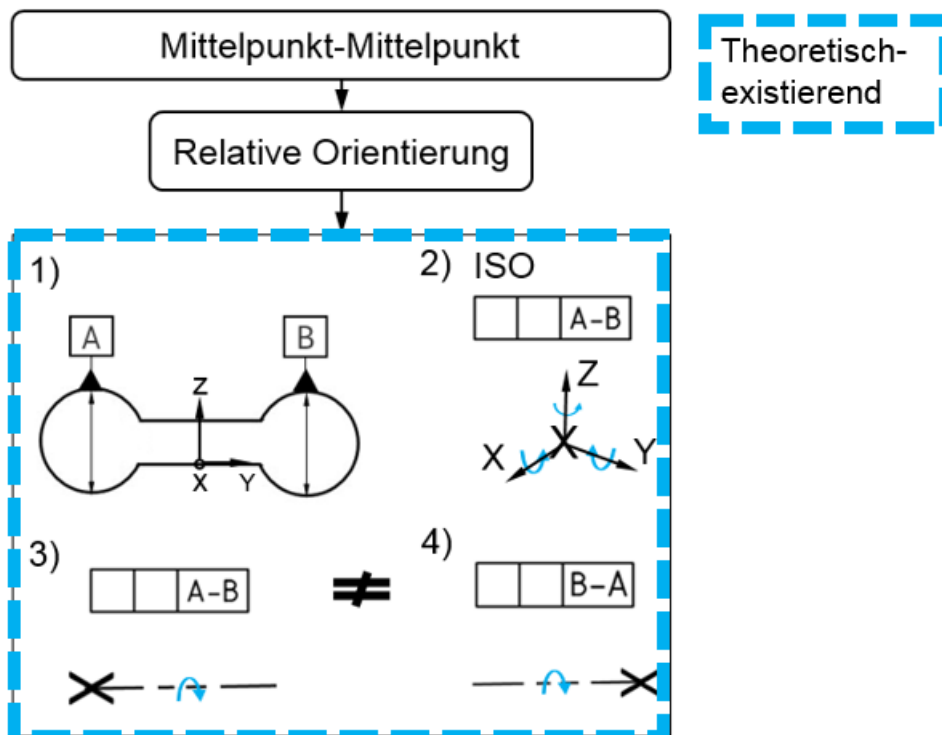


Bild 134 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Mittelpunkt - Mittelpunkt als gemeinsamer Bezug

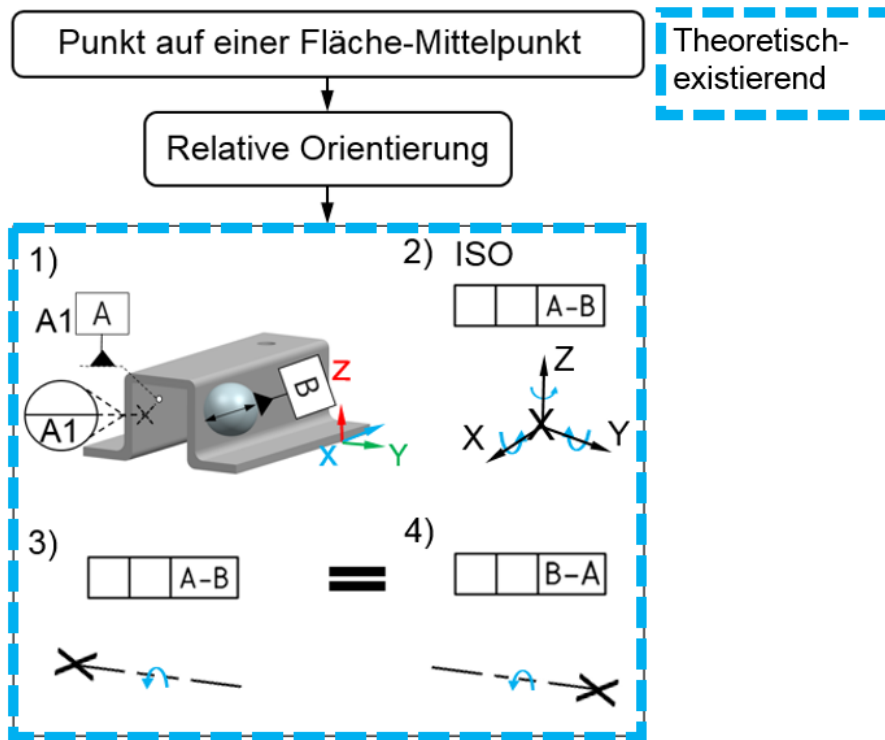


Bild 135 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Punkt auf einer Fläche - Mittelpunkt als gemeinsamer Bezug

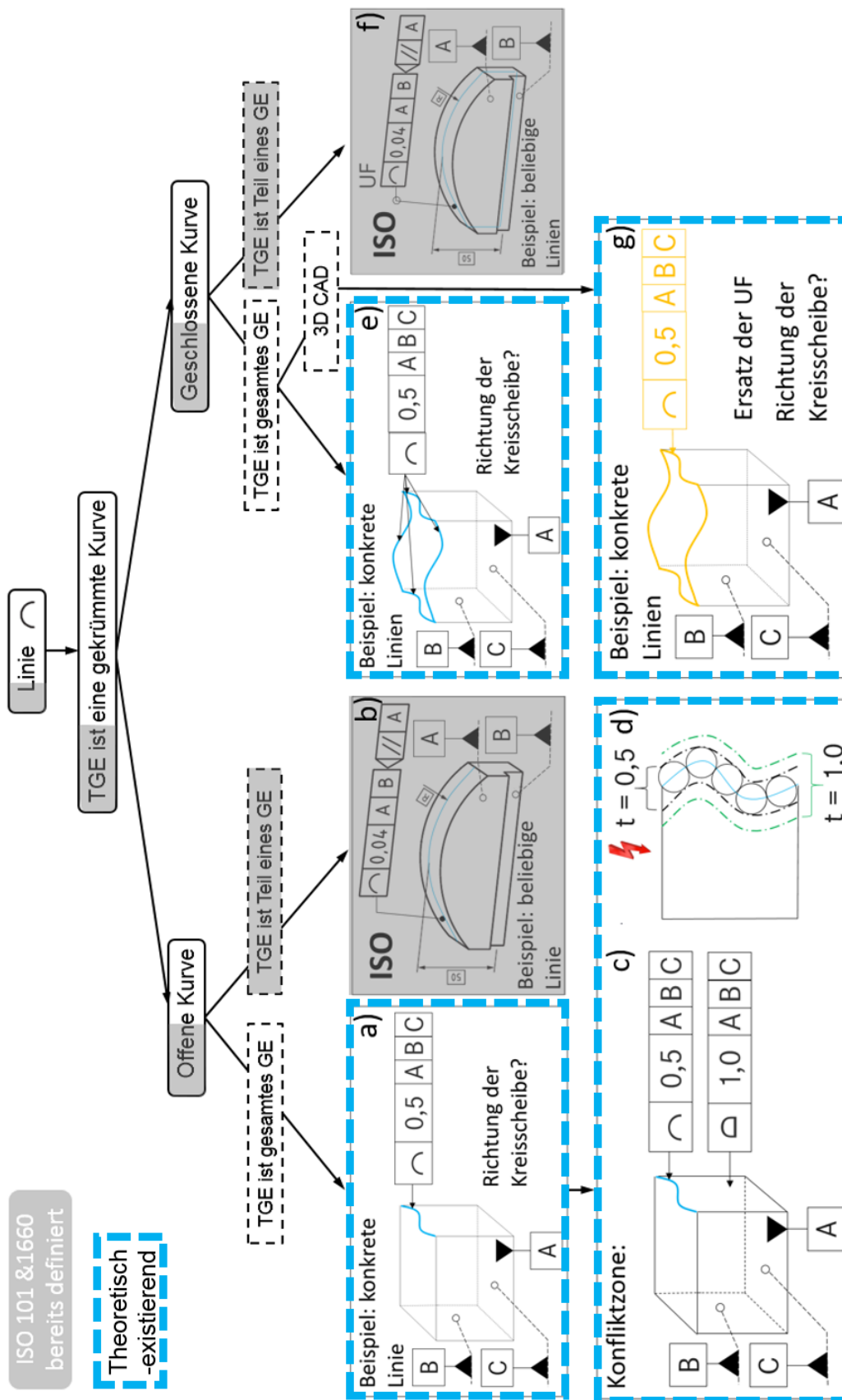


Bild 136 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Linienprofilltoleranz für die Tolerierung einer gekrümmten Kurve

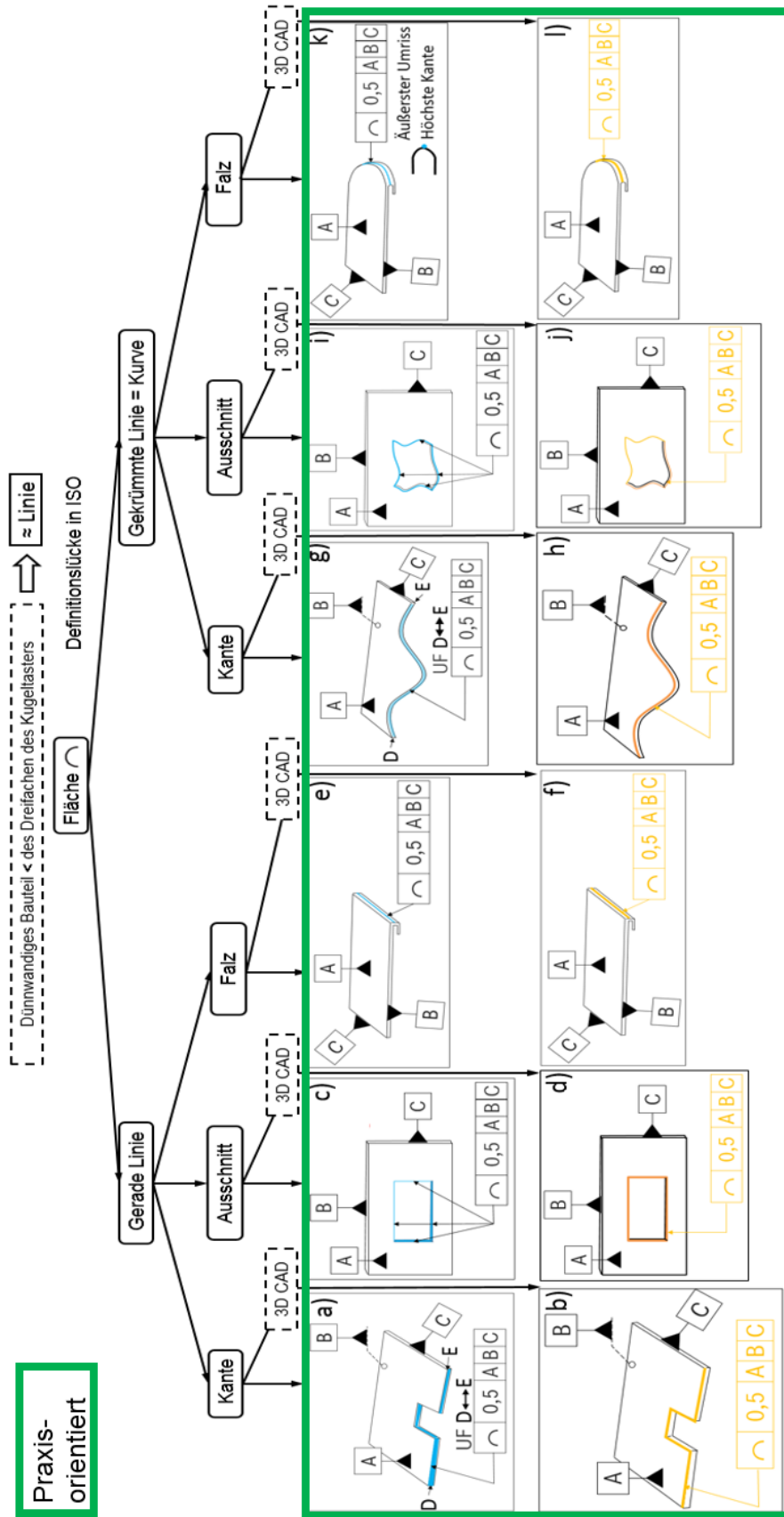


Bild 137 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Linienprofilltoleranz für die Tolerierung einer sehr dünnen Fläche

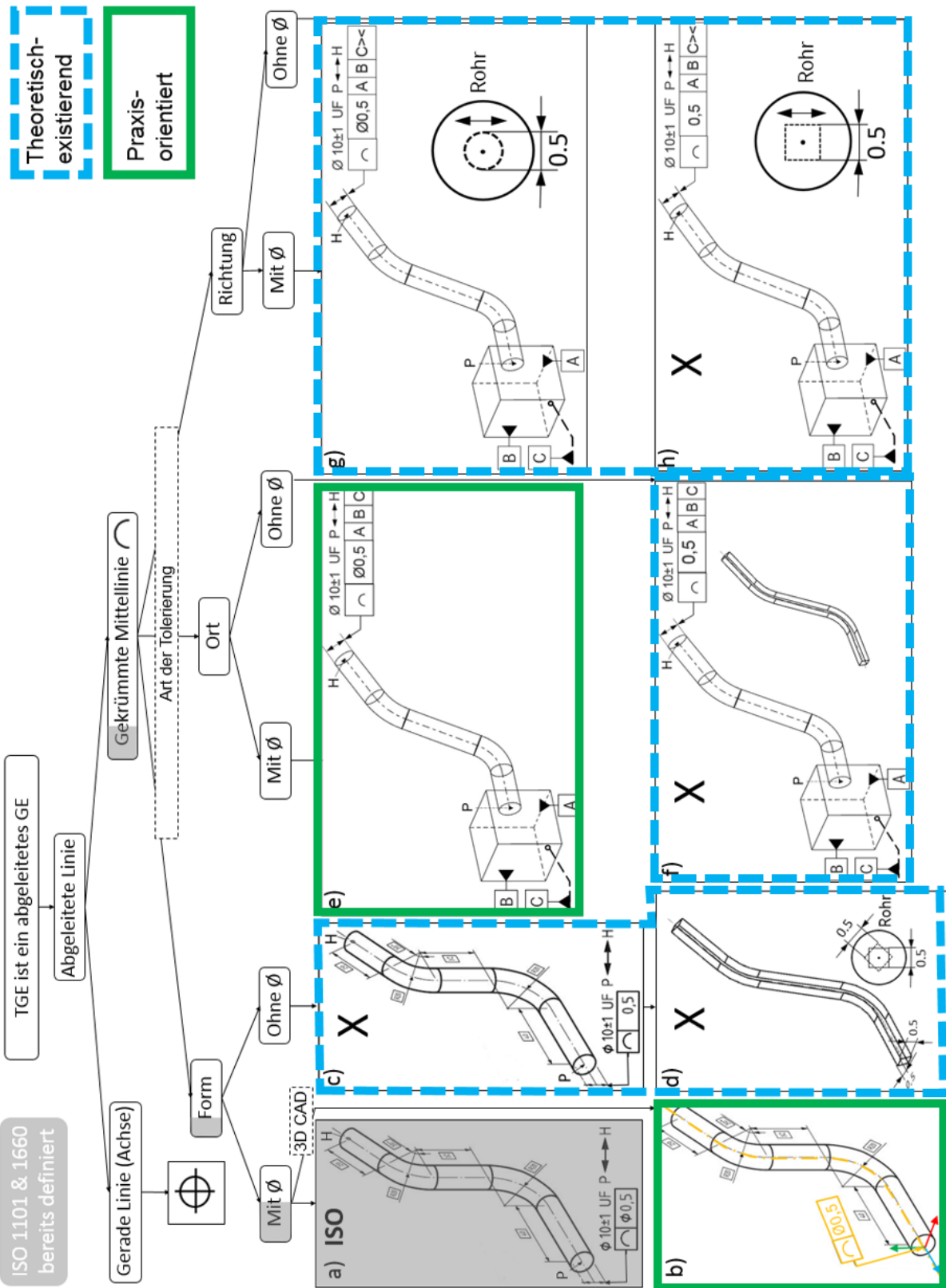


Bild 138 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Linienprofilltoleranz für die Tolerierung einer abgeleiteten gekrümmten Mittellinie

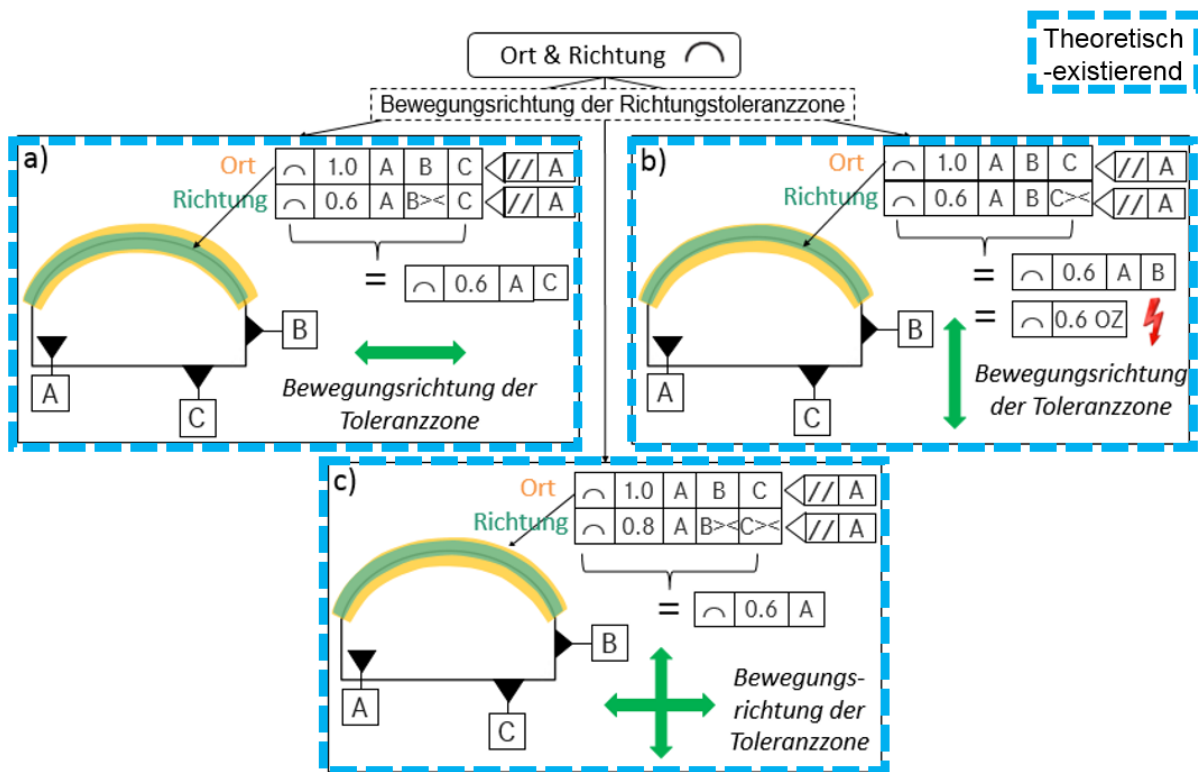


Bild 139 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Linienprofilltoleranz für die Verbundtolerierung von Ort und Richtung

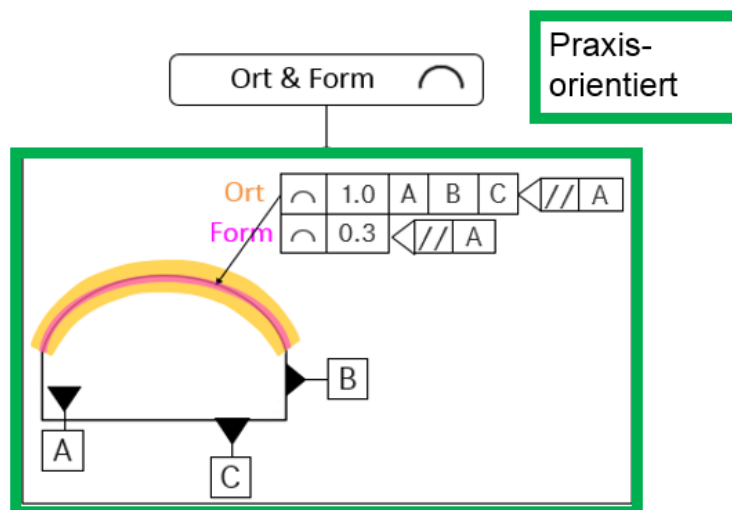


Bild 140 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Linienprofilltoleranz für die Verbundtolerierung von Ort und Form bei dünnwandigen Bauteil

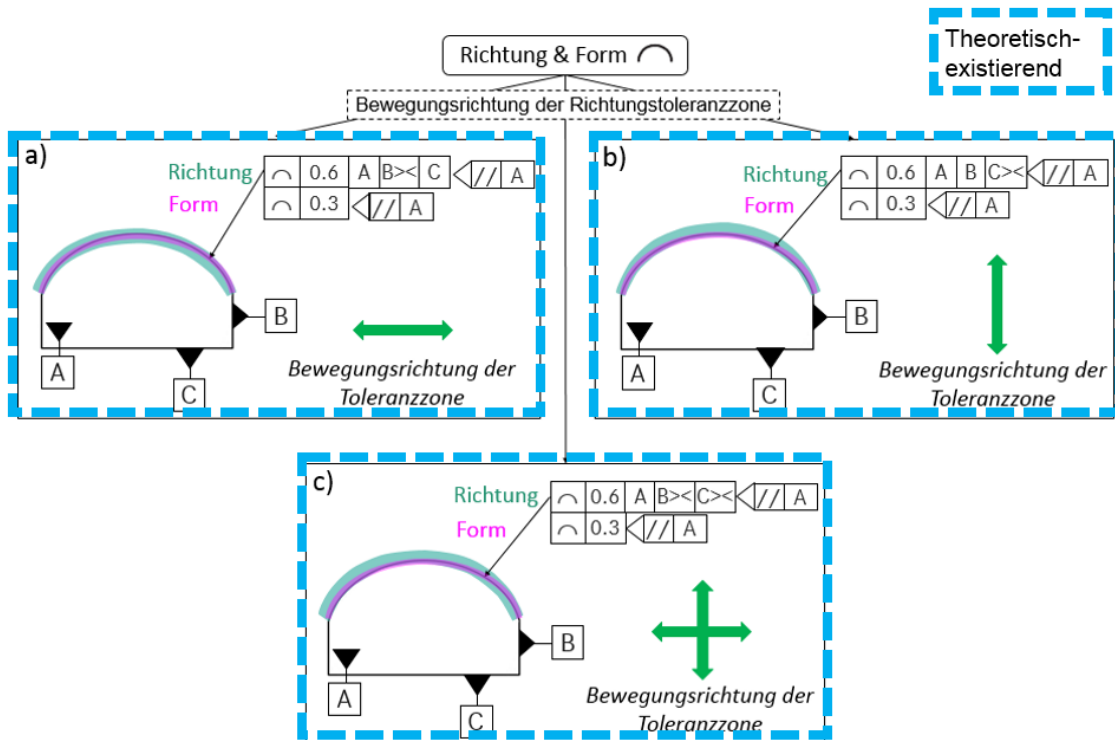


Bild 141 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Linienprofiltoleranz für die Verbundtolerierung von Richtung und Form

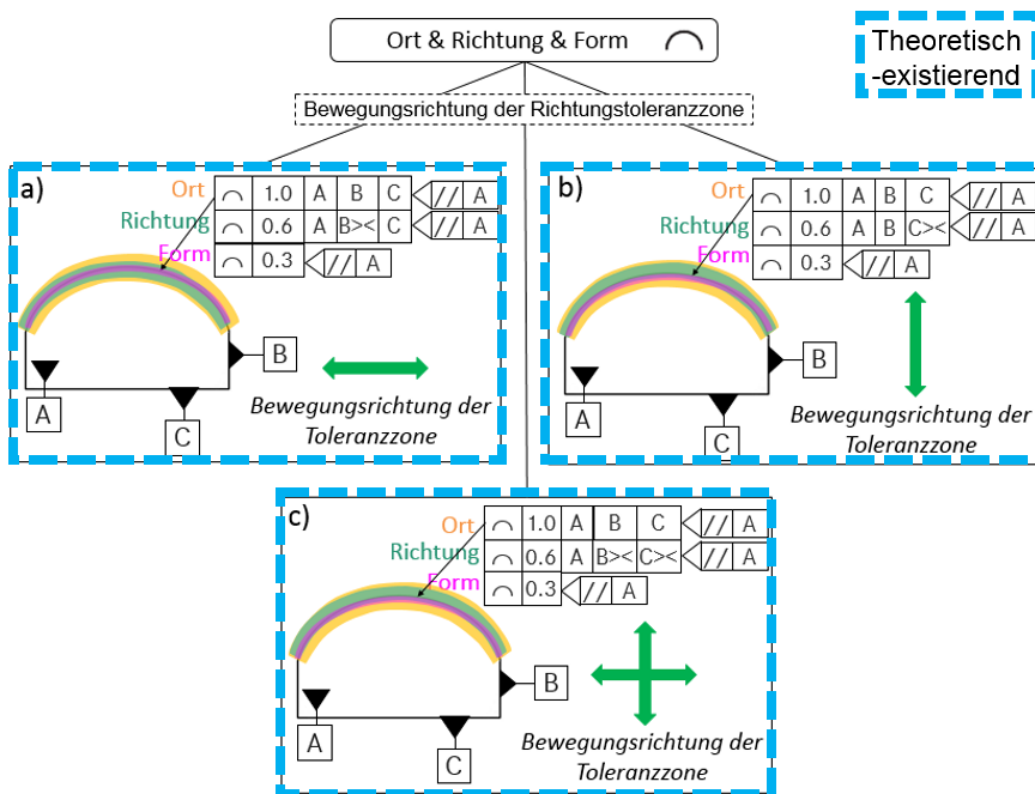


Bild 142 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Linienprofiltoleranz für die Verbundtolerierung von Ort, Richtung und Form

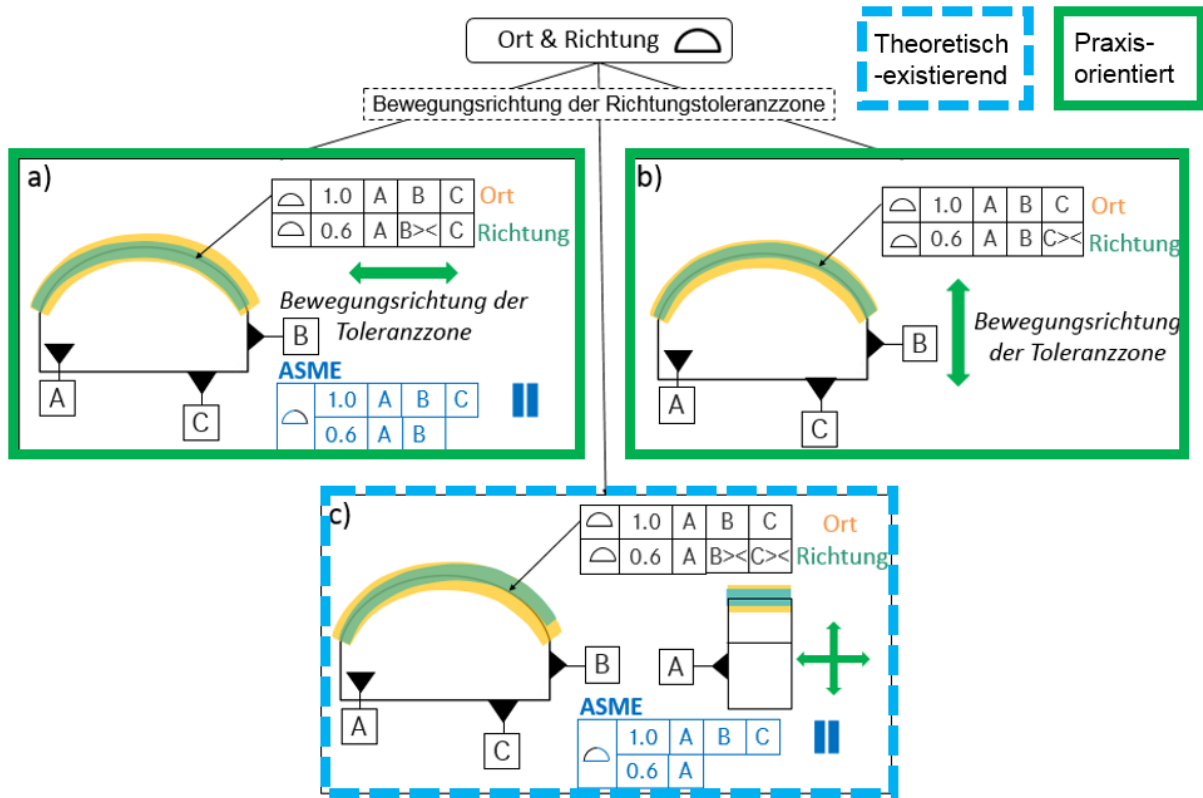


Bild 143 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Flächenprofilltoleranz für die Verbundtolerierung von Ort und Richtung

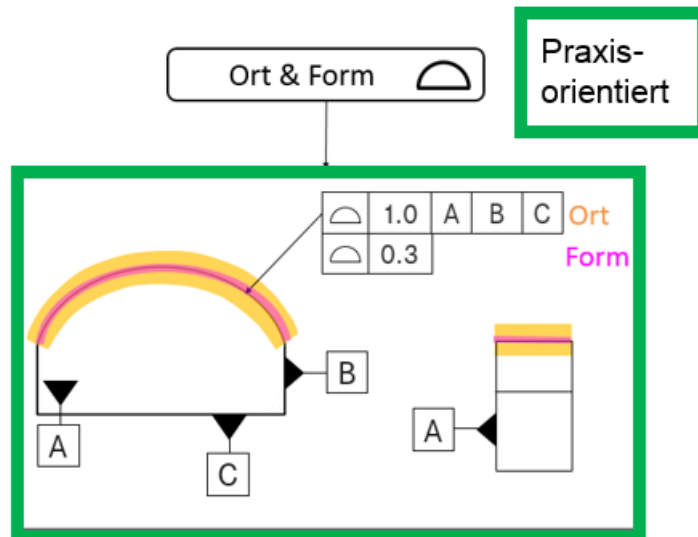


Bild 144 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Flächenprofilltoleranz für die Verbundtolerierung von Ort und Form

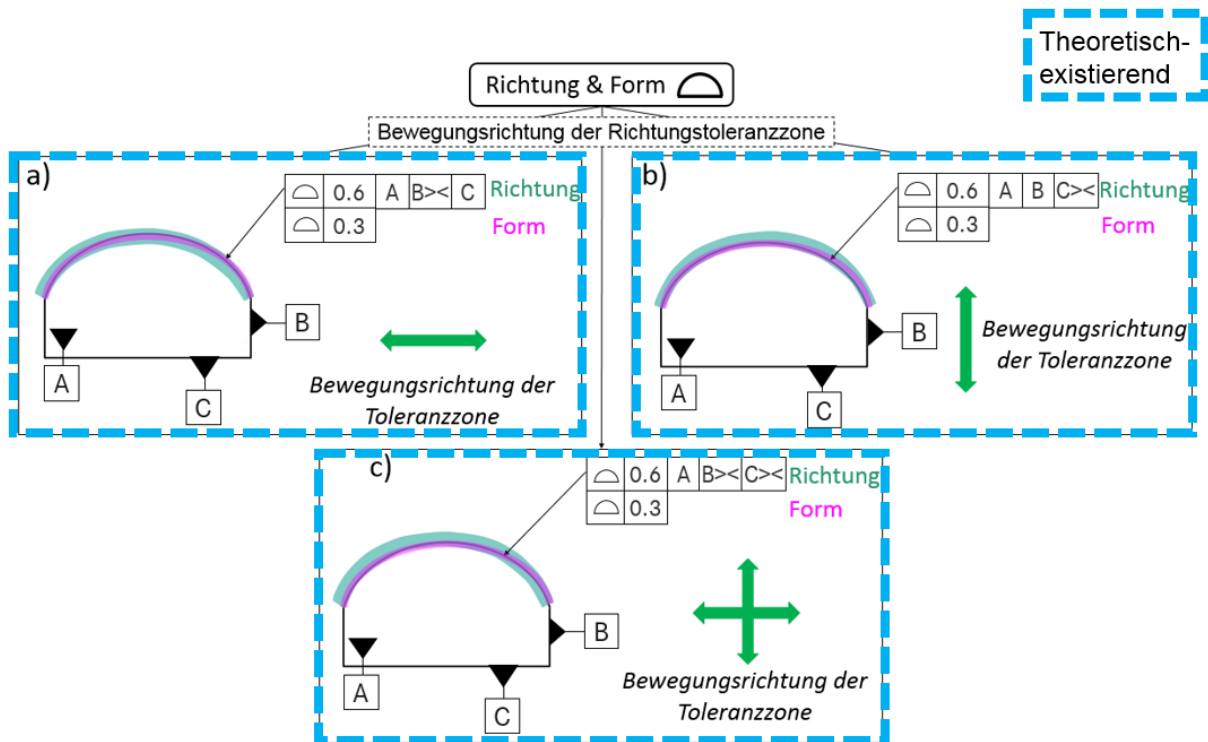


Bild 145 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Flächenprofilltoleranz für die Verbundtolerierung von Richtung und Form

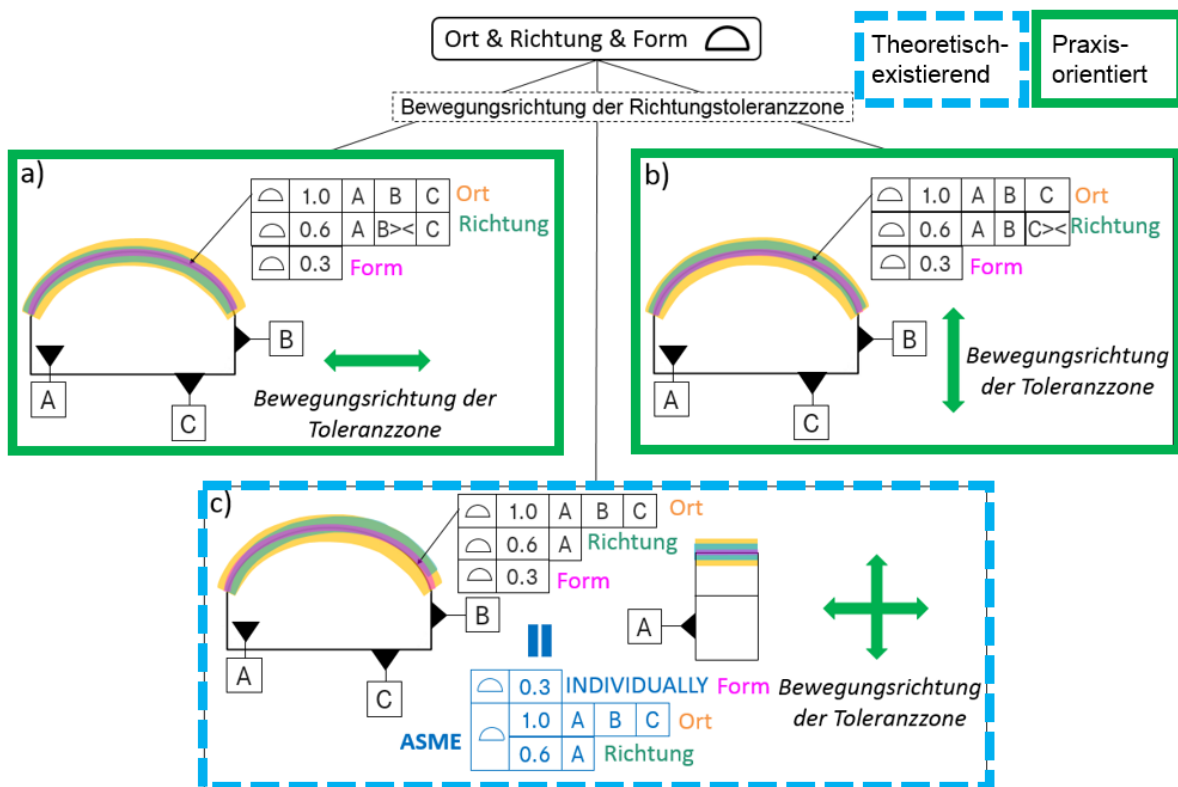


Bild 146 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Flächenprofilltoleranz für die Verbundtolerierung von Ort, Richtung und Form

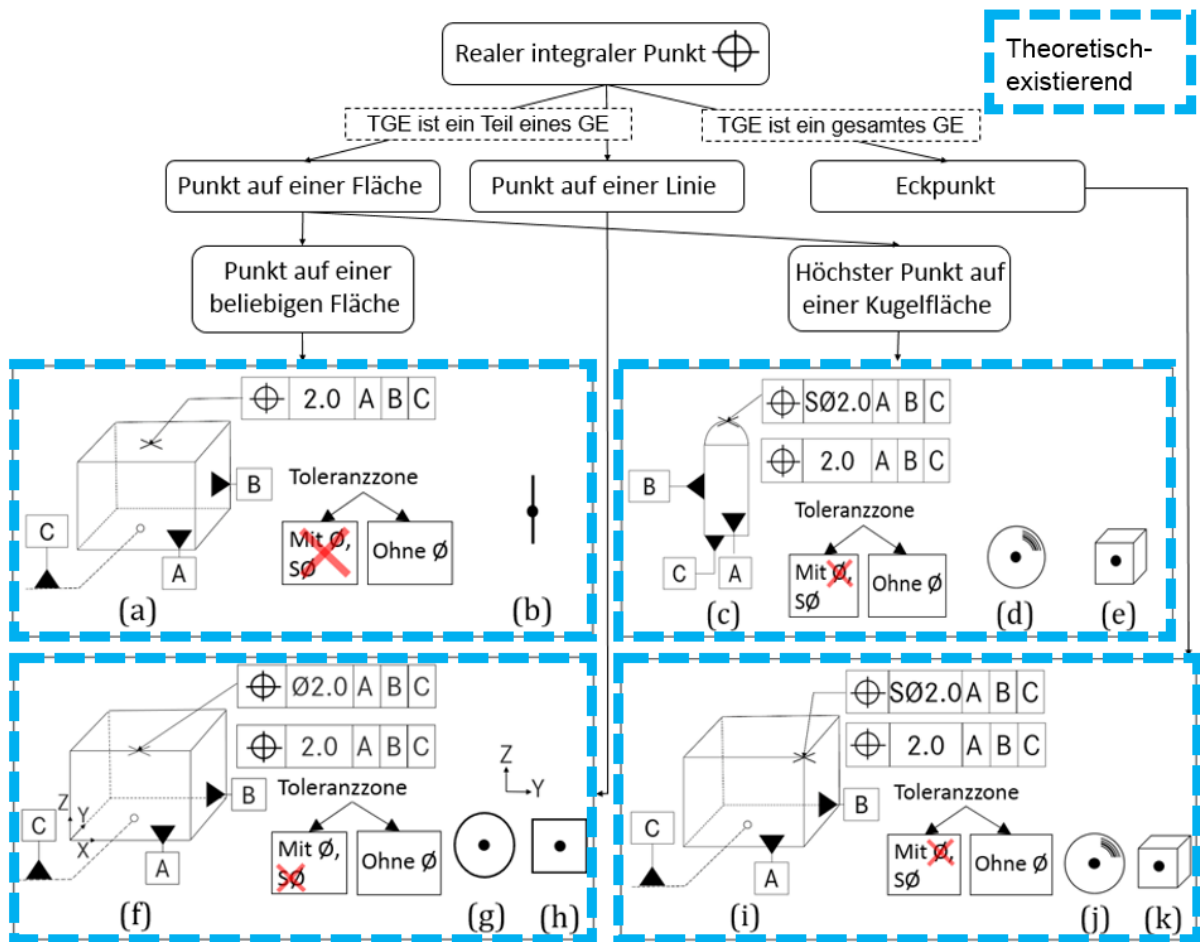


Bild 147 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Positionstoleranz für die Tolerierung eines realen integralen Punkts

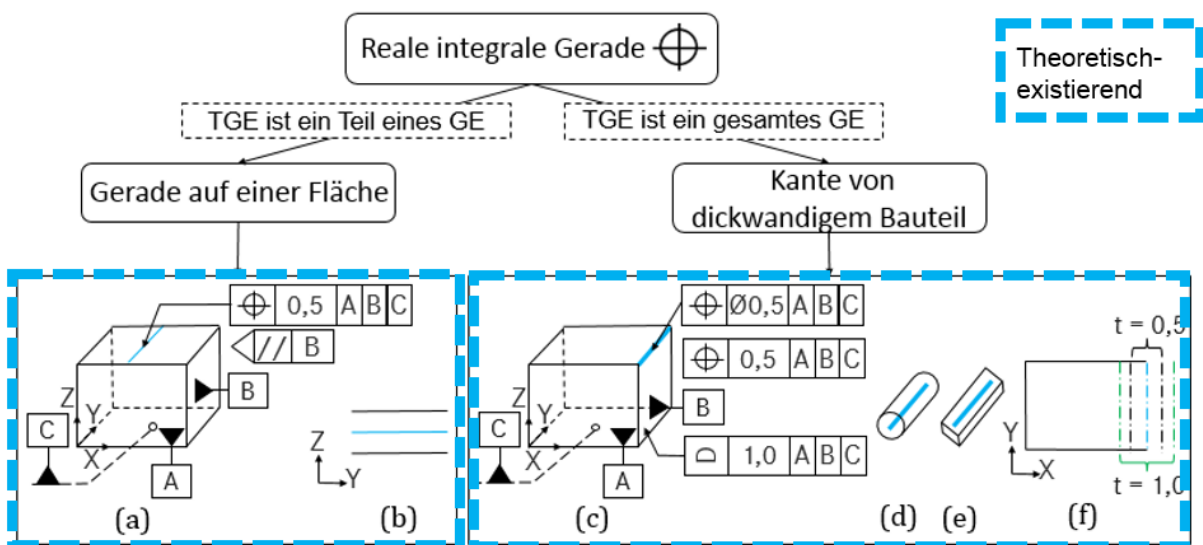


Bild 148 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Positionstoleranz für die Tolerierung einer realen integralen Gerade

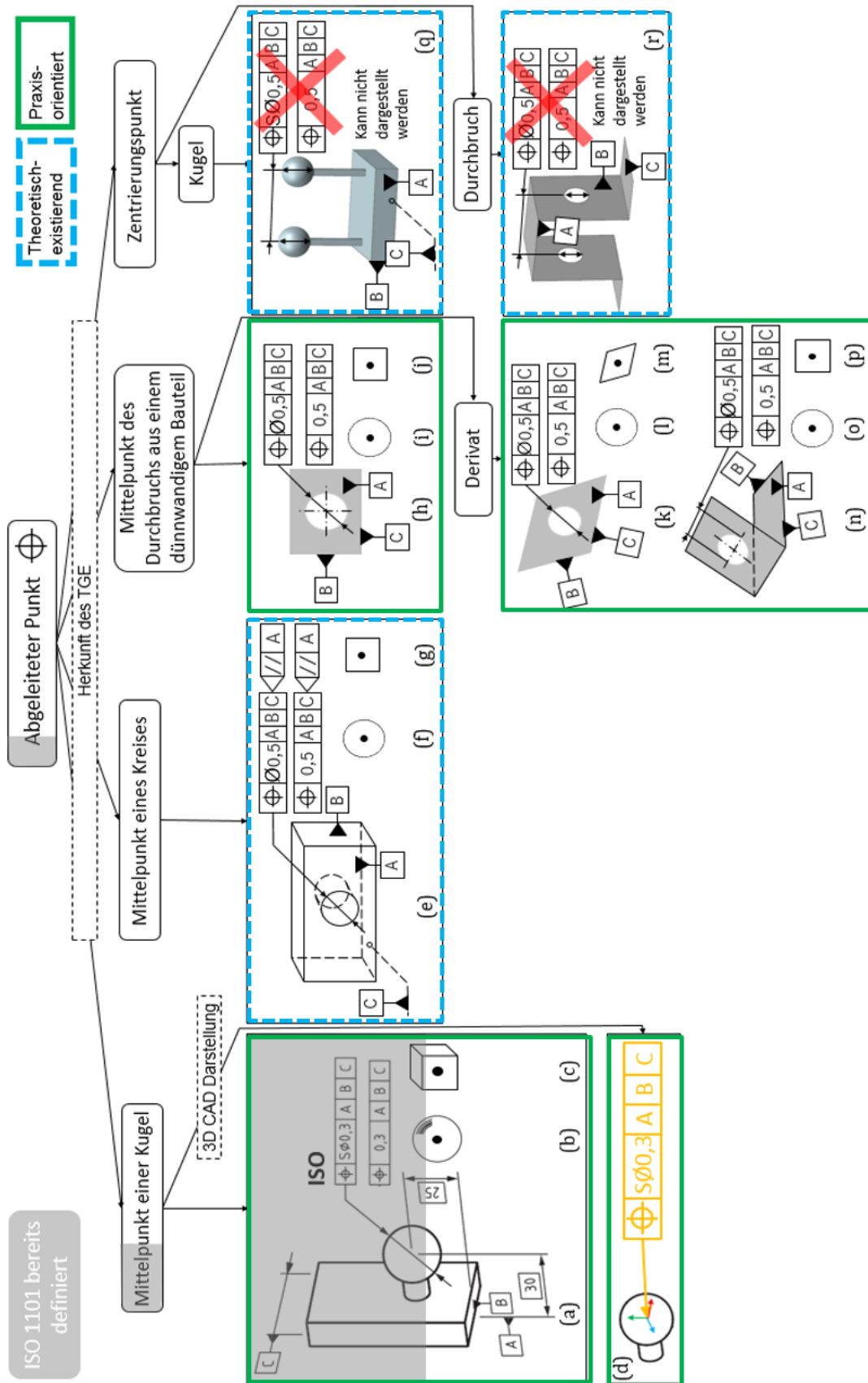


Bild 149 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Positionstoleranz für die Tolerierung eines abgeleiteten Punktes

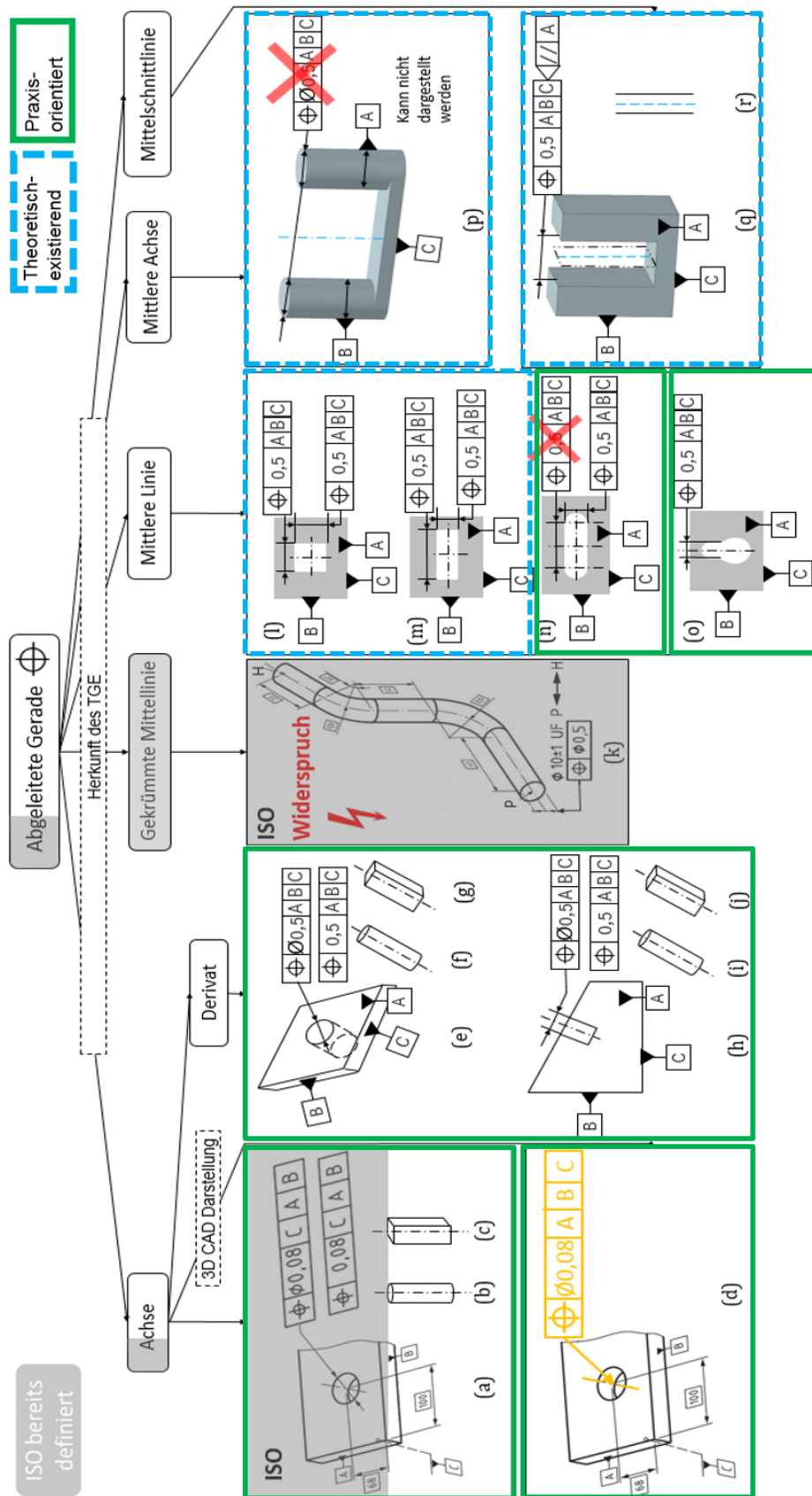


Bild 150 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Positionstoleranz für die Tolerierung einer abgeleiteten Gerade

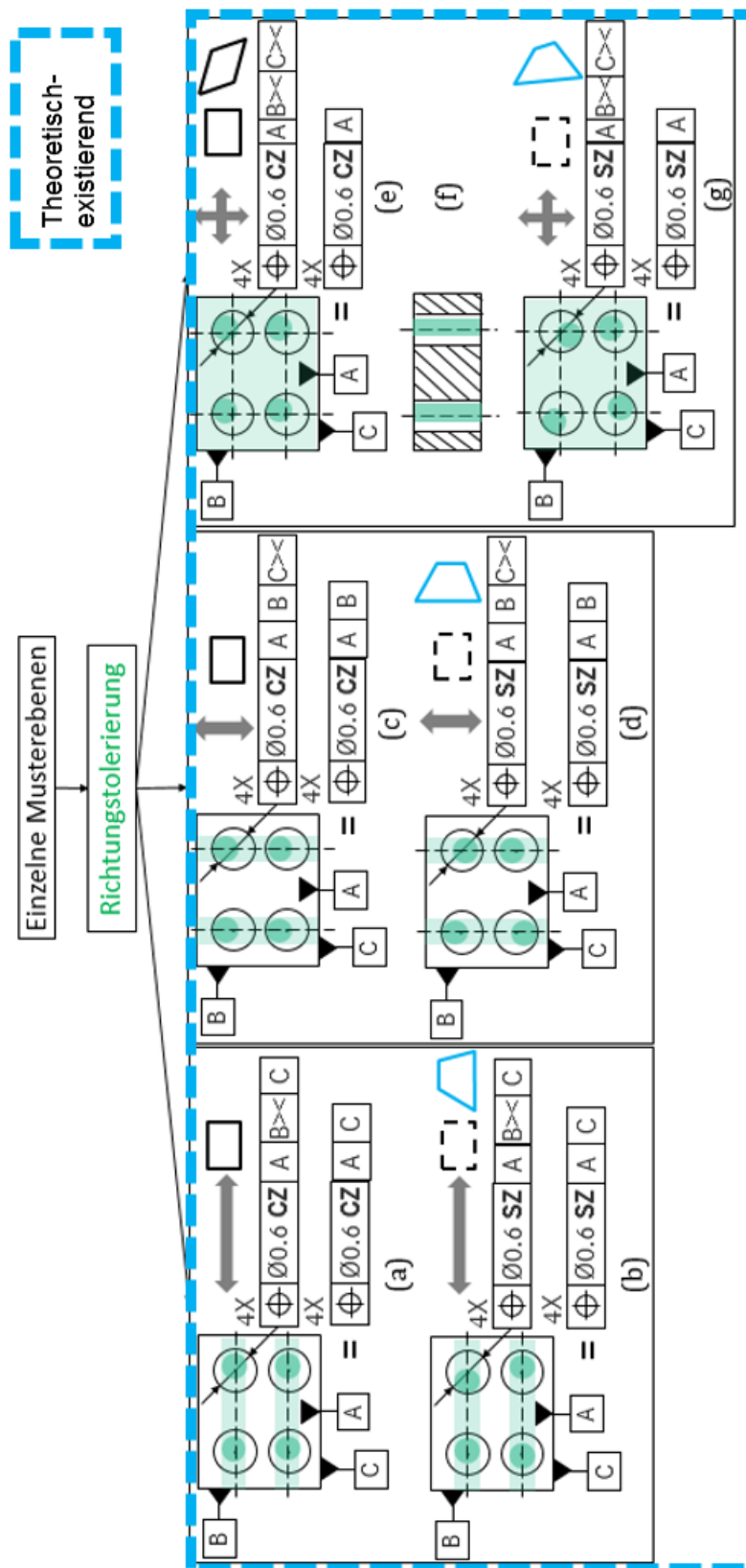


Bild 151 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Positionstoleranz für die Richtungstolerierung bei einer Mustertolerierung mit einem Indikator bei einzelner Musterebene

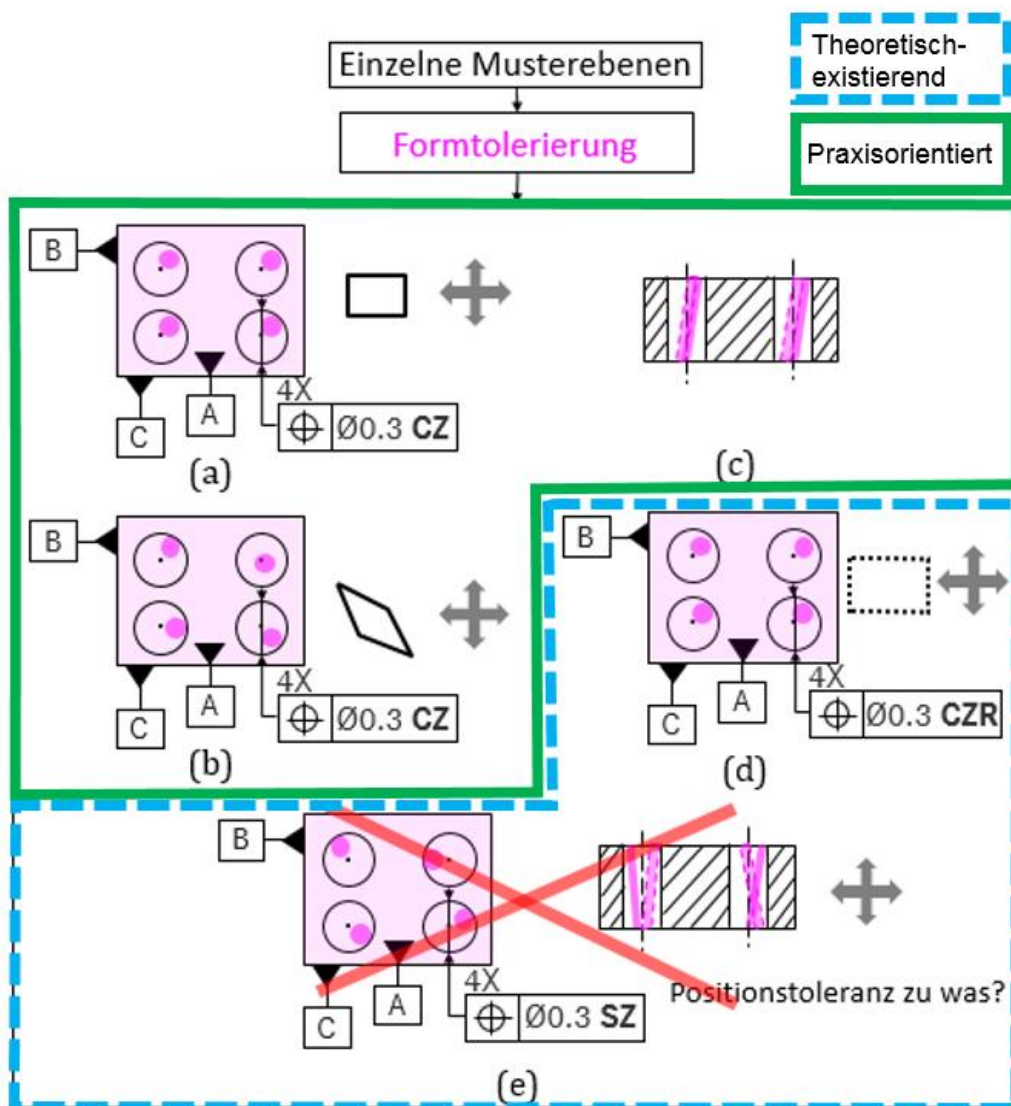


Bild 152 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Positionstoleranz für die Formtolerierung bei einer Mustertolerierung mit einem Indikator bei einzelner Musterebene

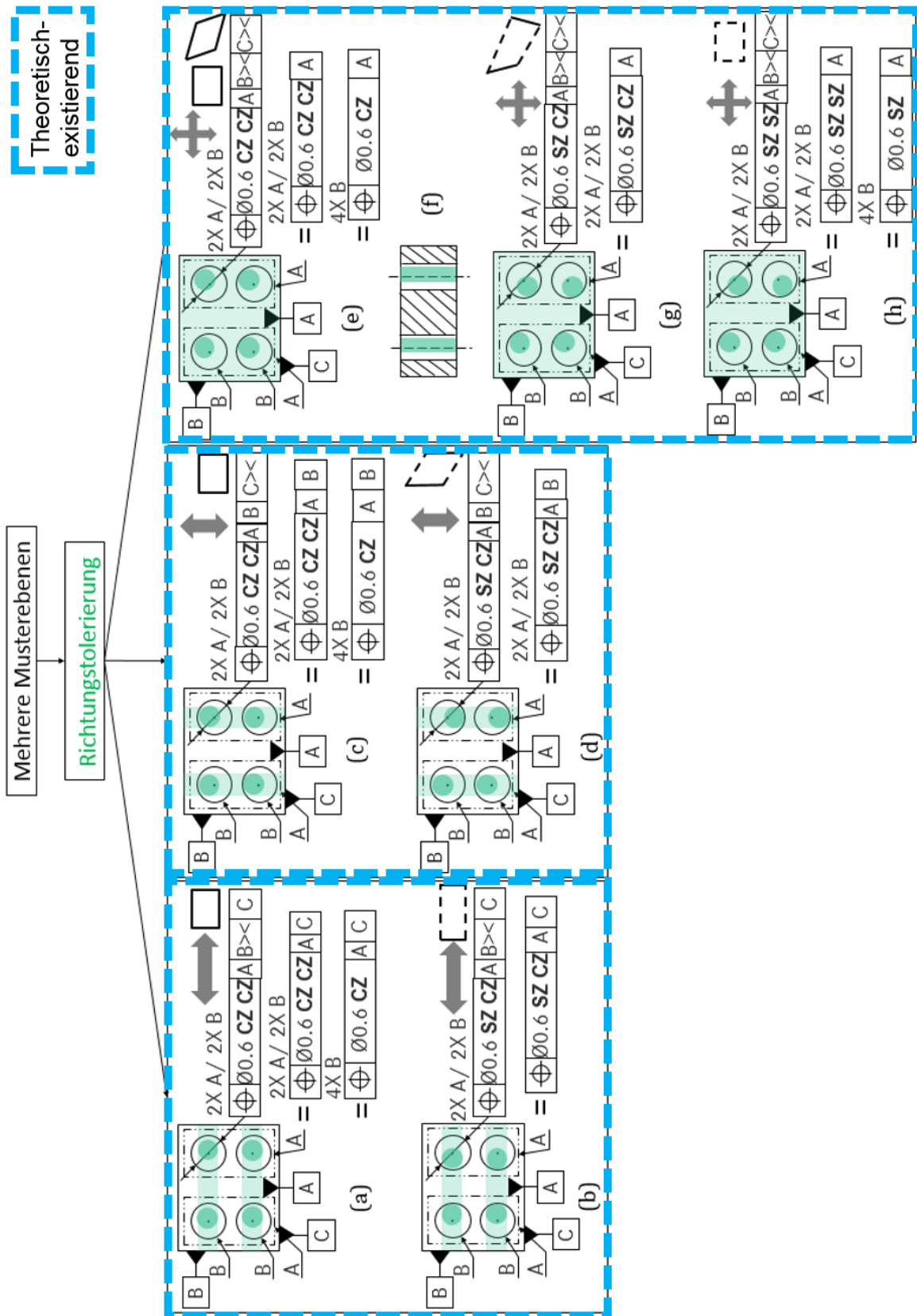


Bild 153 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Positionstoleranz für die Richtungstolerierung bei einer Mustertolerierung mit einem Indikator bei mehreren Musterebenen

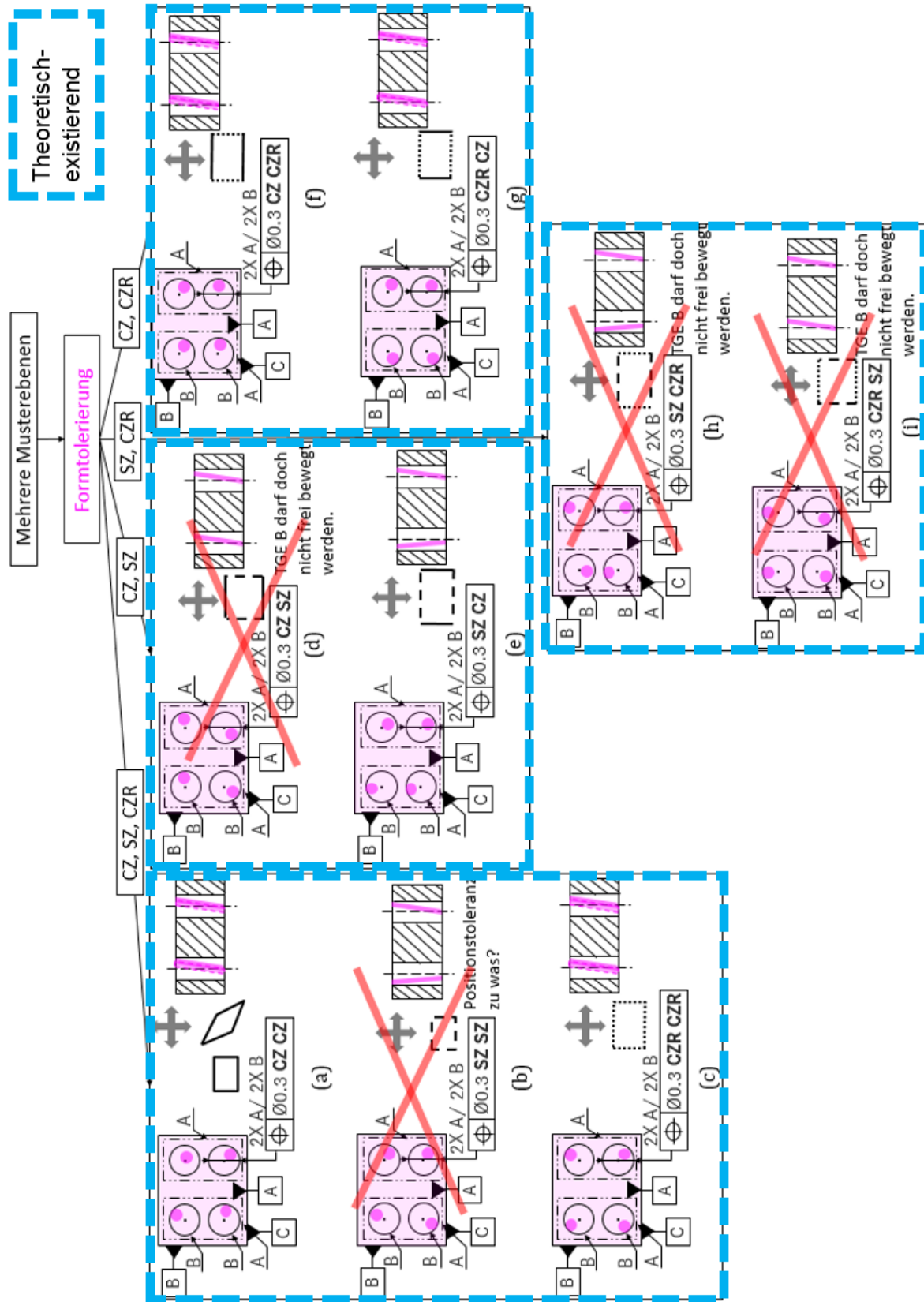


Bild 154 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Positionstoleranz für die Formtoleranz bei einer Mustertoleranz mit einem Indikator bei mehreren Musterebenen

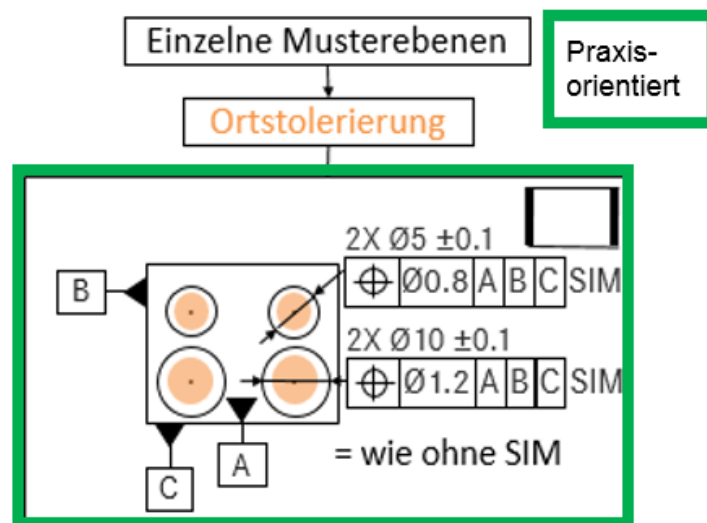


Bild 155 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Positionstoleranz für die Ortstolerierung bei einer Mustertolerierung mit mehreren Indikatoren bei einzelner Musterebene

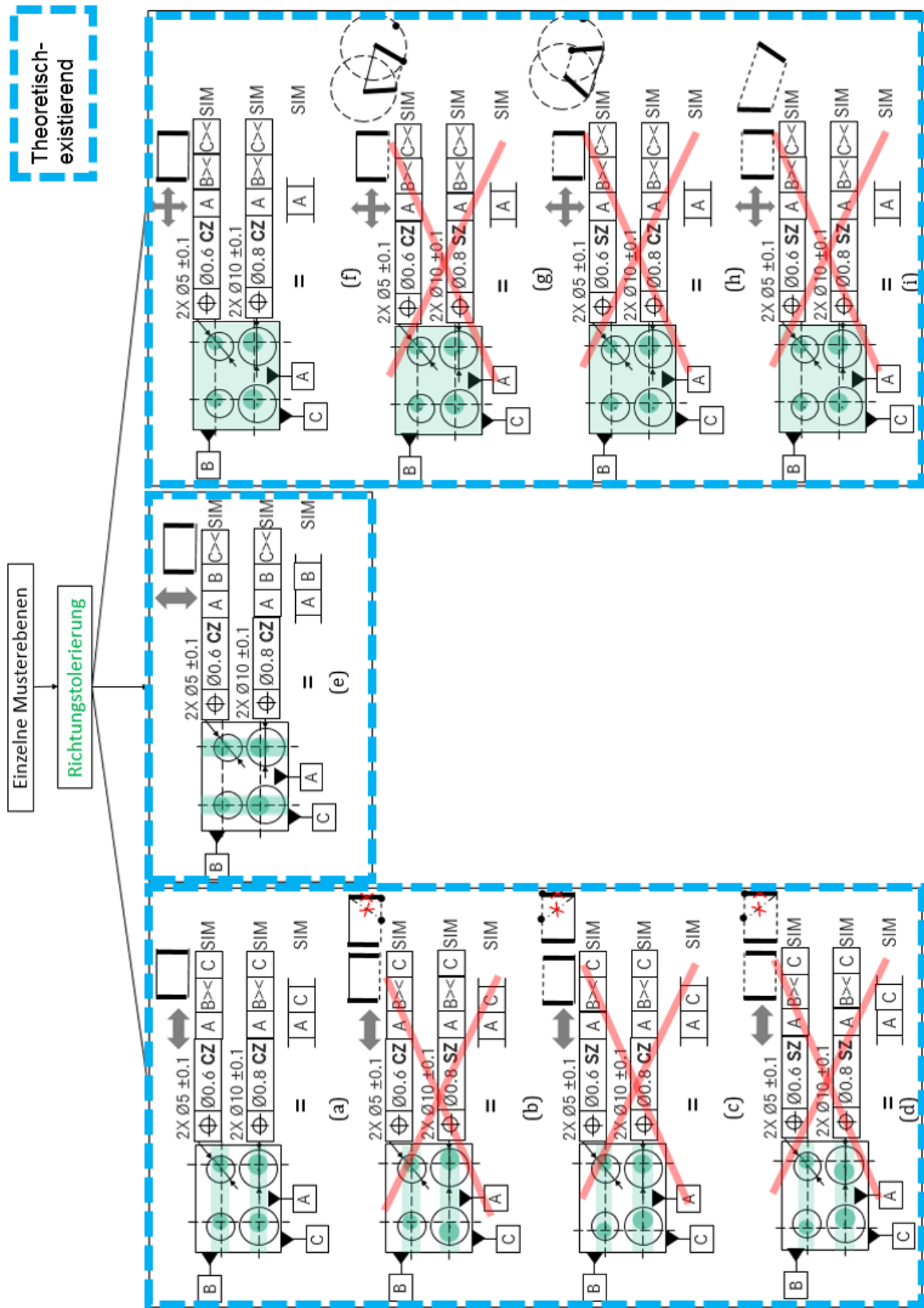


Bild 156 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Positionstoleranz für die Richtungstolerierung bei einer Mustertolerierung mit mehreren Indikatoren bei einzelner Musterebene

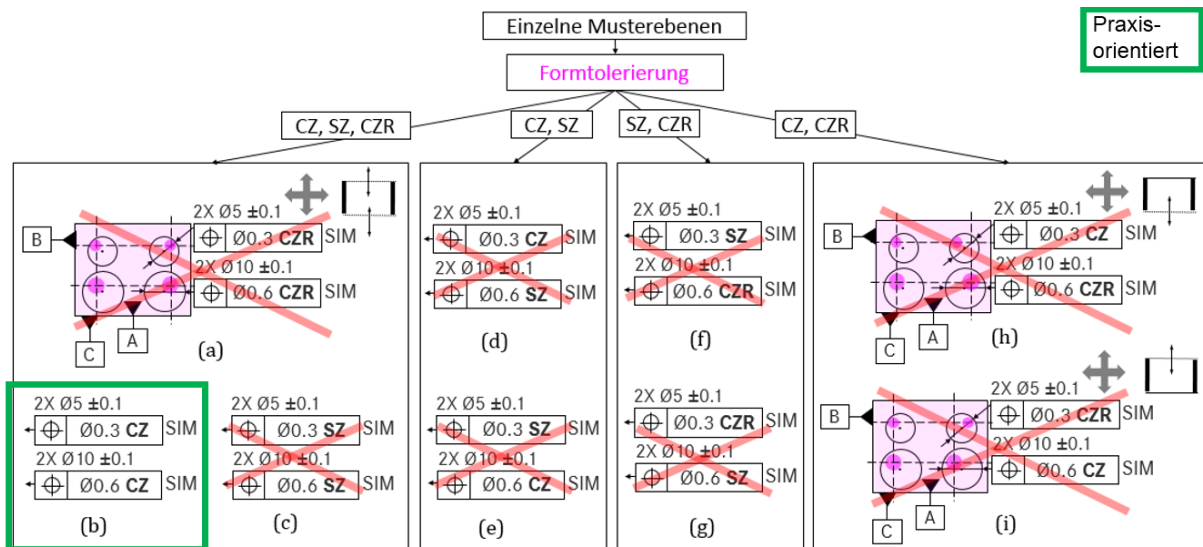


Bild 157 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Positionstoleranz für die Formtolerierung bei einer Mustertolerierung mit mehreren Indikatoren bei einzelner Musterebene

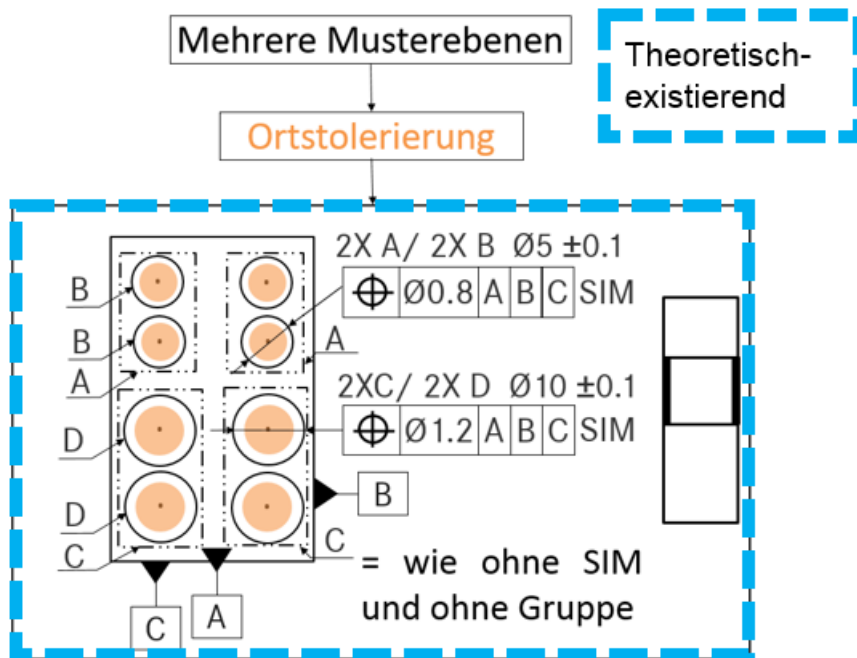


Bild 158 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Positionstoleranz für die Ortstolerierung bei einer Mustertolerierung mit mehreren Indikatoren bei mehreren Musterebenen



Bild 159 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Positionstoleranz für die Richtungstolerierung bei einer Mustertolerierung mit mehreren Indikatoren bei mehreren Musterebenen

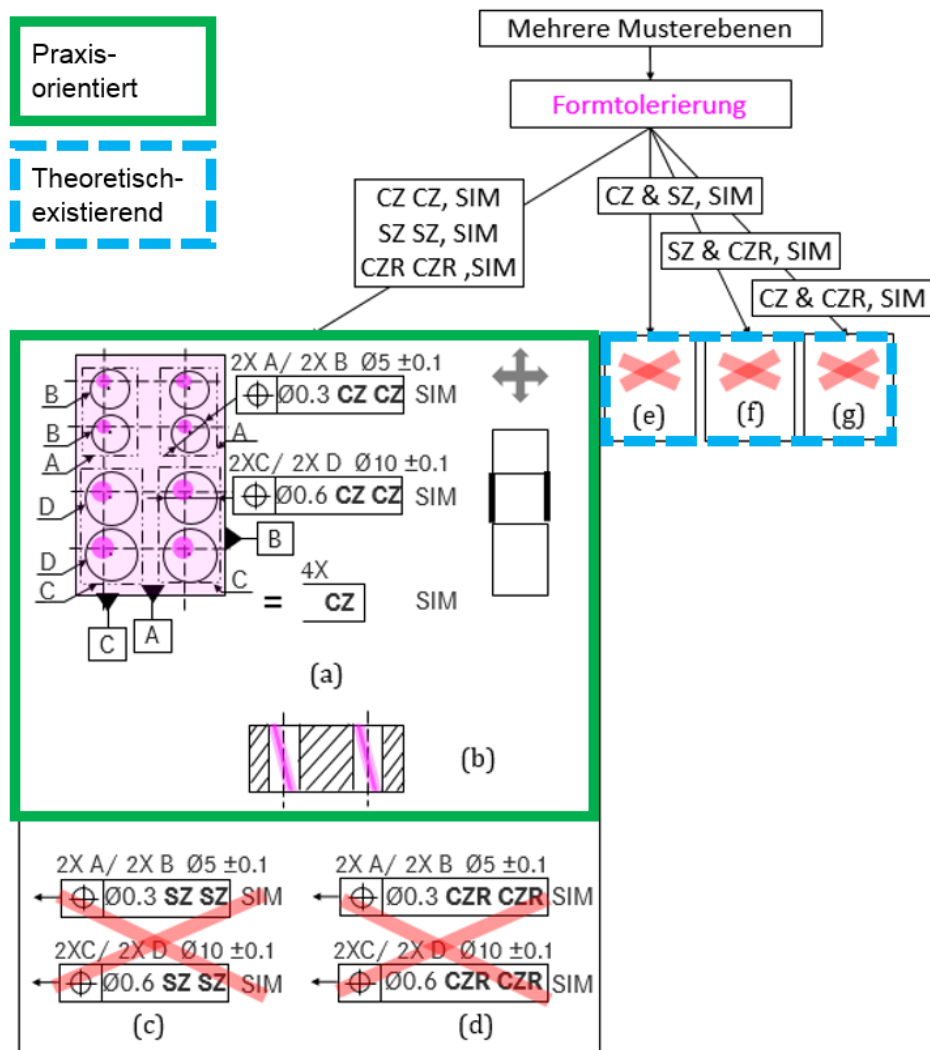


Bild 160 Klärung der Anwendbarkeit der Systematik: Positionstoleranz für die Formtolerierung bei einer Mustertolerierung mit mehreren Indikatoren bei mehreren Musterebenen

ISBN 978-3-00-061987-8