1 Einleitung

1.1 Herausforderung Großbauteilmontage

Automatisierte Montageprozesse sind heute ein fester Bestandteil der industriellen Fertigung. So gehören robotergestütze Montagestraßen zum Stand der Technik in der Automobilbranche [23, 50], und auch für Kleinbauteile sogenannter Mikro- oder Nanosysteme existieren bereits zahlreiche praxiserprobte Anwendungen [16, 50, 60]. Je größer und komplexer – und komplizierter – die betrachteten Objekte sind, desto geringer ist jedoch häufig der *AUTOMATISIERUNGSGRAD* der Fertigungsanlagen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt werden viele Prozeßschritte bei der Montage von Großkomponenten in der Luft- und Raumfahrtindustrie, im Schiffbau, bei der Fertigung von Schienenfahrzeugen, Behältern und ähnlichem noch in manuellen oder mechanisierten *ARBEITSSTATIONEN* vollzogen [22, 69, 77, 92, 135]. Oft entspricht die Montage in diesen Bereichen eher dem Prototypenbau als einer Serienfertigung. Damit verbunden ist ein hoher Anteil an Vorbereitungsarbeiten, die sich in langen Rüstzeiten niederschlagen [15]. Gründe für den scheinbaren technischen Rückstand der Großbauteilmontage gegenüber anderen Fertigungsgebieten sind die Eigenschaften der Montageobjekte, hohe technische Anforderungen an die Systeme und wirtschaftliche Beschränkungen.

Das Halten und Bewegen von Objekten sind wesentliche Funktionen des Handhabens und werden durch Systeme wie Greifer, Manipulatoren, Stellachsen oder anderes übernommen. Unter dem Begriff "Objekte" sind hier Werkzeuge in gleicher Weise zu verstehen wie Werkstücke. Das Halten beschränkt sich dabei nicht nur auf das Sichern der augenblicklichen *LAGE* (auch als räumliche Anordnung bezeichnet) des Objekts in allen sechs Freiheitsgraden, sondern schließt auch formunterstützende Funktionen mit ein. Großkomponenten erhöhen aufgrund ihrer Abmessungen (Greifweiten) und ihres Gewichtes (Haltekräfte) die Anforderungen an Handhabungssysteme; nicht zuletzt auch deshalb, weil sie im unmontierten Zustand eine geringere Steifigkeit aufweisen als im gefertigten Verbund. Um Schäden durch plastische Verformungen oder Kollisionen zu vermeiden, müssen Handhabungssysteme deshalb über ausreichend Halte- und Stützfunktionen verfügen.

Zu den technischen Herausforderungen zählen weiterhin die in einem Produktionsprozeß erreichbaren Toleranzen. Sie ergeben sich aus der Summe zufälliger und systematischer Fehler von Einzelbauteilen und Baugruppen sowie Prozeßschritten und sind größenabhängig. Die Forderung, Objekte auf wenige Zehntelmillimeter genau zu *POSITIONIEREN*, ist für Bauteile mit einer Ausdehnung von 10 bis 30 m (oder mehr) also ungleich schwerer zu erfüllen als für solche mit einer Größe von 2 bis 5 m, wie sie im Automobilbau üblich sind.

Geringe Stückzahlen und lange Modellwechselzyklen gehören zu den wirtschaftlichen Hemmnissen bei der Umsetzung von Entwicklungsschritten (Automatisierung, Flexibilisierung etc.) in der Großbauteilmontage und haben in der Vergangenheit die kontinuierliche Entwicklung und Weiterentwicklung von Montageanlagen gebremst. Der Zeitpunkt für die Realisierung neuer Technologien in praktischen Anwendungen, das heißt für neue Produktionsanlagen, war und ist aus Amortisierungsgründen oft an die Einführung neuer Produkttypen oder -modelle gebunden. Statt vieler kleiner Entwicklungsschritte innerhalb kurzer Zeit müssen zu Beginn langer Produktionszeiten große Modernisierungsprojekte vollzogen werden. Auf Seiten der Kunden ist jedoch auch der Bedarf an angepaßten, individuellen und schnell verfügbaren Lösungen gestiegen, was zu einer Diversifizierung der Produktspektren geführt hat [80].

Aufgrund der dargestellten Anforderungen wurden in den vergangenen Jahren neue Lösungsansätze für eine Flexibilisierung und Automatisierung der Großbauteilmontage gesucht [22, 83]. Neben der Beibehaltung bzw. Steigerung von Qualitätsansprüchen standen vor allem die Verkürzung von Durchlaufzeiten und eine schnellere Integration neuer Produkte in den Herstellungsprozeß im Vordergrund. Diese Entwicklung hält gegenwärtig an und wird sich auch in den nächsten Jahren fortsetzen. Der Bereich der Luftfahrt hat hier eine Vorreiterrolle übernommen [2, 8, 83, 97, 101, 114, 115, 129].

1.2 Ziel der Arbeit

Die Automatisierung der Großbauteilmontage führt zu einem erhöhten Bedarf an Meßinformationen im Sinne einer *PROZEßINTERNEN* Ist-Zustandserfassung, das heißt der Ermittlung von Daten für den weiteren Fertigungsablauf sowie die Qualitätssicherung. Vor allem Koordinatenmessungen an Montageobjekten gehören zu den unabdingbaren Voraussetzungen für eine (teil-)automatisierte Fertigung. Aufgrund ihrer hohen Genauigkeit, aber auch wegen guter Eigenschaften in puncto Zuverlässigkeit und Handhabung, erfreuen sich Lasermeßsysteme derzeit einer großen Verbreitung.

Um die wachsenden Anforderungen an die Großbauteilmontage auch zukünftig zu erfüllen, sind weitere Entwicklungen im Bereich der Meßsysteme vonnöten. Diese Arbeit soll dazu beitragen, in folgenden Punkten eine Verbesserung gegenüber dem aktuellen Stand zu erreichen:

1. höhere Genauigkeit der *AUSGABE*werte von *MEßGERÄTEN*;
2. größere Unabhängigkeit gegenüber Umgebungsbedingungen.

Um eine möglichst industrienahe Lösung zu entwickeln, dient ein derzeit am Markt verfügbares Meßgerät als Basis. Das System wird in der lieferbaren Form eingesetzt und soll geräteseitig nicht verändert werden. Durch die meßtechnische Erfassung und Verarbeitung von Umgebungsparametern und die Nutzung der zur Verfügung

stehenden Meßsignale in prozeßbezogenen Berechnungsmodellen sollen drei Verbesserungsschritte umgesetzt werden:

1. Überwachung von Messungen und Absicherung der Ergebnisse hinsichtlich stochastischer Fehlereinflüsse;
2. *KOMPENSATION* systematischer Fehler, das heißt wesentlicher, zeitlich und örtlich schwankender Prozeßparameter;
3. Steigerung der Genauigkeit von 3D-Koordinaten auf Basis einer selektiven Verarbeitung von Meßsignalen.

Neben einer Steigerung der Meßgenauigkeit, womit die erreichbaren Fertigungstoleranzen weiter verringert werden können (technische Verwertbarkeit), stellt die Desensibilisierung von Meßprozessen gegenüber Umwelteinflüssen einen wesentlichen wirtschaftlichen Vorteil dar, da sie helfen kann, den Umfang störungsreduzierender Maßnahmen zu mindern. Dies betrifft einerseits die Notwendigkeit, Produktionsprozesse und damit verbundenen Tätigkeiten zugunsten eines ungestörten Meßablaufes zu unterbrechen, andererseits könnte zukünftig auf bau- oder anlagentechnische Schutzmaßnahmen – soweit sie ausschließlich der Störungsreduktion in bezug auf Meßprozesse dienen – verzichtet werden.

2 Industrielle Fertigung von Großkomponenten

2.1 Großbauteilmontage

Die sichere Handhabung von Objekten und das Erreichen einer ausreichend hohen Fertigungsgenauigkeit gehören zu den wesentlichen Herausforderungen bei der Montage von Großkomponenten. *VORRICHTUNGEN* können helfen, diese Ziele umzusetzen [77, 135]. Anschläge, Ablagen, *SCHABLONEN* und andere geometrische Funktionselemente geben nicht nur die genaue Lage eines Objektes vor, sondern unterstützen auch die Soll-Form der Bauteile. Im allgemeinen werden Vorrichtungen regelmäßig (etwa halbjährlich) überprüft [78], so daß eine Kontrolle während Montageprozessen nicht notwendig ist. Es kann davon ausgegangen werden, daß ein Bauteil in Lage und Form den Anforderungen der Montage entspricht, wenn es korrekt in der geprüften Vorrichtung abgelegt wird. Dem Vorteil der einfachen Handhabung stehen – neben weiteren – zwei entscheidende Nachteile gegenüber. Einerseits werden durch die turnusmäßige Prüfung der Vorrichtungen Fehler nur indirekt und zeitlich verzögert wahrgenommen. Um schnell reagieren und die Summe der auftretenden Fehler möglichst gering halten zu können, ist eine Messung relevanter Parameter direkt an den Objekten während der Montage vonnöten. Ein weiteres Manko ist die Bauteilabhängigkeit der Funktionselemente. Starre Vorrichtungen lassen sich nur begrenzt an abweichende *BAUMUSTER* anpassen, so daß im Extremfall für die Montage eines neuen Produktes erst eine neue Vorrichtung gebaut werden muß. Abbildung 2-1 illustriert dies am Beispiel der Montage von Flugzeugrumpfsegmenten unterschiedlicher Durchmesser. Infolge abweichender Maße können die größeren Bauteile (b) nicht in der *FERTIGUNGSANLAGE* für kleinere Rumpfdurchmesser (a) montiert werden.

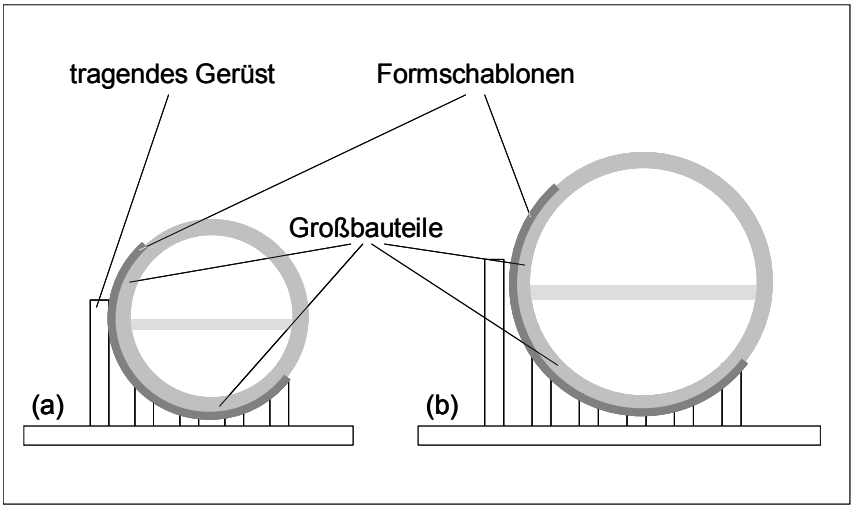

Abbildung 2-1: Fertigung nach dem Vorrichtungsprinzip (Beispiel: Flugzeugrumpfsektion)

Während das Vorrichtungsprinzip *PROZEßINTEGRIERTE* Messungen nicht ausschließt, ist eine größere Variabilität und Geometrieunabhängigkeit hinsichtlich der gefertigten Produktvarianten nur begrenzt erreichbar, beispielsweise durch austauschbare, geometrisch ähnliche Formelemente. Im Schiffbau gibt es seit langem verstellbare, elastische Schablonen, welche an unterschiedliche Strakformen angepaßt werden können. Bezogen auf Bauteilschnittstellen ist dieser Lösungsansatz allerdings nicht ohne weiteres übertragbar. Mit Hilfe von Stempellehren [135] können Fertigungsmittel jedoch an unterschiedliche Konturen ein- oder zweiachsig gekrümmter Bauteile angepaßt werden (Abbildung 2-2, oben). Vor allem bei der Fertigung von Montageobjekten aus Blech- und Einzelteilen hat diese Methode an Bedeutung gewonnen [145]. Bezogen auf größere Montageverbunde oder Sektionen wird die Höhe von Auflagepunkten auch durch Maßblöcke (Holz / Beton), sogenannte Pallen, eingestellt (Abbildung 2-2, unten).

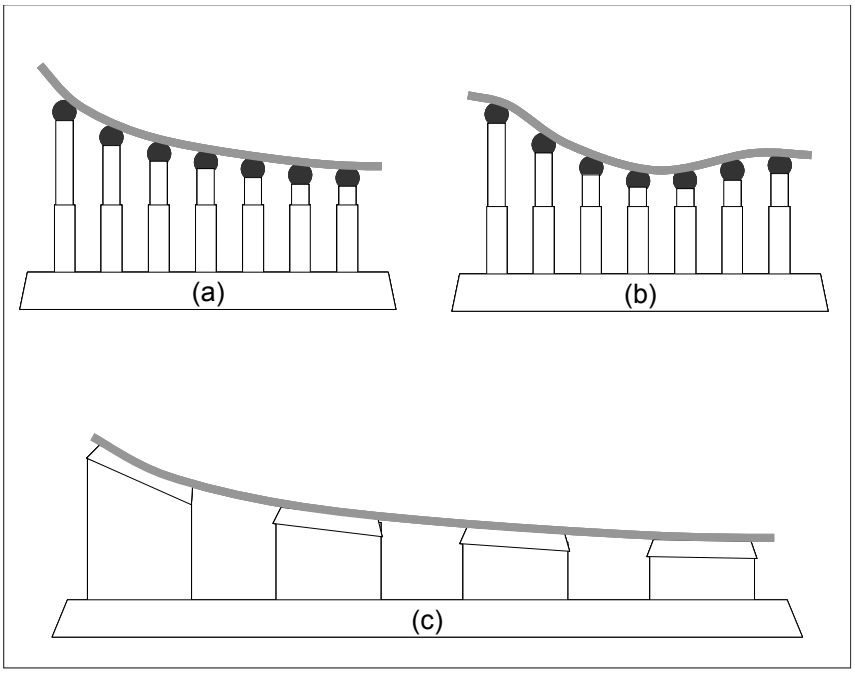

Abbildung 2-2: Anpassen einer Fertigungsstation an Bauteilkonturen durch Stempellehren (oben) oder Pallen (unten)

Häufig genügt das Anpassen einer Kontur alleine jedoch nicht. In flexiblen Montagezellen sollen mit Hilfe von Greifern und Positionierern Bauteile unterschiedlicher Form und Größe aufgenommen und verschiedenartige Prozeßschritte ausgeführt werden (Abbildung 2-3). Dieses Konzept erlaubt es, hinsichtlich der Anlagenbestandteile auf kostenintensive Hilfsmittel wie Anschläge oder Formschablonen zu verzichten und den Bedarf an Vorrichtungselementen oder sogar an Vorrichtungen zu reduzieren. Gleichzeitig lassen sich auf diese Weise Rüstzeiten reduzieren. Im Sinne einer Anpassungsfähigkeit der Fertigungsanlage an Bauteile unterschiedlicher Größe und Form kann es auch möglich sein, sich stark unterscheidende Objekte im selben Bauplatz zu montieren (Abbildung 2-4).

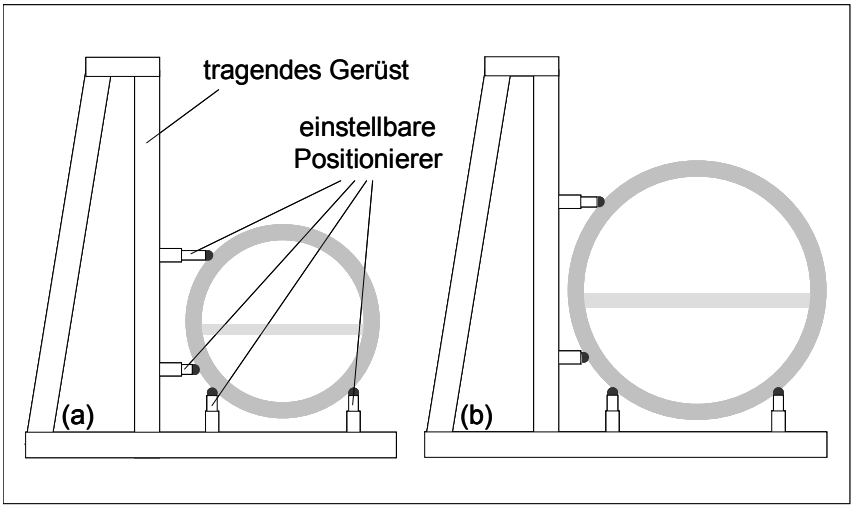

Abbildung 2-3: Flexibler Montagebauplatz für die Fertigung verschiedener Rumpfsektionen, Größenvariabilität

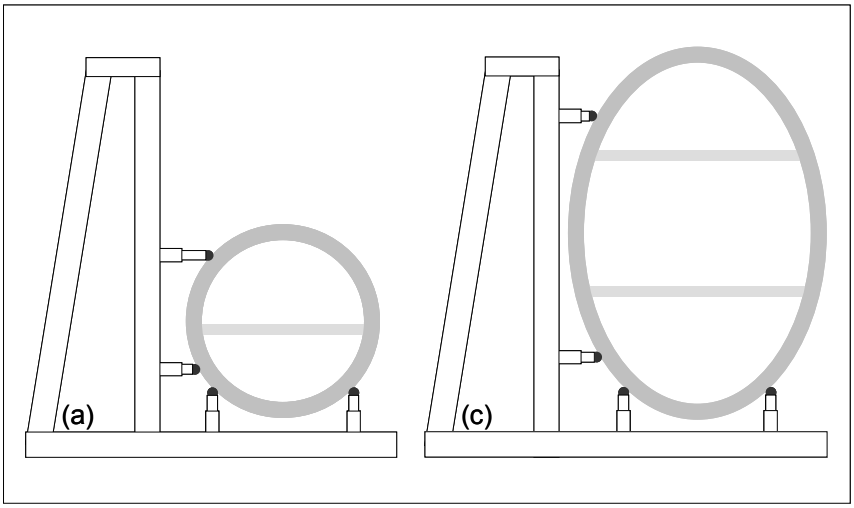

Abbildung 2-4: Flexibler Montagebauplatz für die Fertigung verschiedener Rumpfsektionen, Größen- und Formvariabilität

Die *POSITIONIERUNG* von Objekten zueinander, das heißt ihre Ausrichtung in allen sechs Freiheitsgraden, setzt ein gemeinsames, beschreibendes (Welt-)Koordinatensystem voraus. Vor allem dann, wenn eine Fertigung der Einzelteile mit ausreichend geringen Toleranzen nicht möglich oder sehr aufwendig ist, kann das Bezugskoordinatensystem an externen Referenzpunkten in der Fertigungsanlage definiert werden. Dies war in der Vergangenheit zum Teil im Schiffbau der Fall (Abbildung 2-5). Die einzelnen Paneele oder Schiffssektionen wurden mit einer Materialzugabe gefertigt, welche dem Toleranzausgleich während der Montage diente [82, 87]. Heute werden auch im Bereich der Werften hohe Toleranzanforderungen erfüllt. Die Fertigung von Einzelteilen mit Materialzugabe ist nicht mehr Stand der Technik. Deshalb werden wie im Flugzeugbau Referenz- und Weltkoordinatensysteme zunehmend an Bauteilen definiert (Abbildung 2-5).

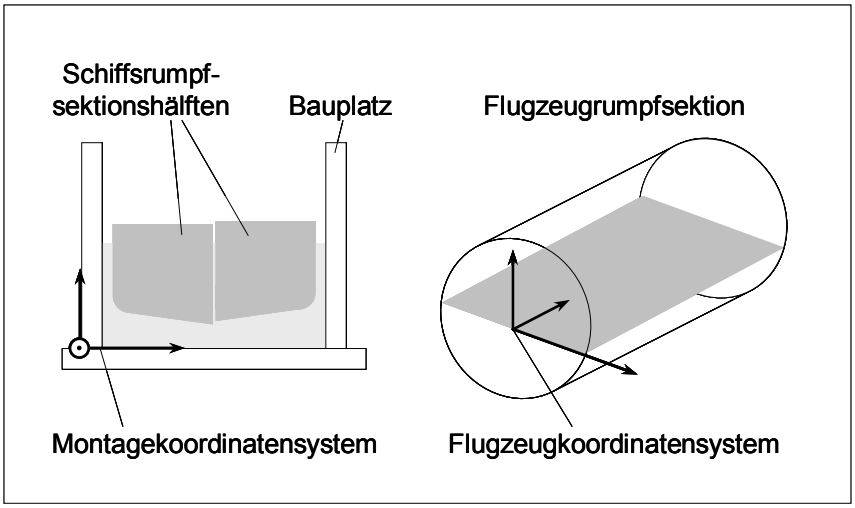

Abbildung 2-5: Externe und bauteilbezogene Referenzkoordinatensysteme

In der vorrichtungsorientierten Flugzeugmontage wurden bisher lokale Toleranzausgleiche in den Schnittstellen benachbarter Bauteile oder Baugruppen vorgenommen. Im Sinne automatisierter Lösungen wird zunehmend ein sogenannter "Best-Fit-Ausgleich" über mehrere Bauteile und mehrere Bauteilschnittstellen angestrebt [8]. Einen anderen Lösungsweg offeriert das Konzept des "Zusammensteckens", auch "Part-to-Part" oder "Determined Assembly" [84, 99] genannt. Wie bei Lego-Bausteinen werden Schnittstellen mit Minimal-Toleranzen definiert, so daß kein Toleranzausgleich vorgenommen werden muß. DIETZMANN [22], MIEBACH [82], NIKOLAY [87] und andere haben gezeigt, daß auch im modernen Schiffbau ähnliche Konzepte anwendbar und praxistauglich sind.

2.2 Automatisierung und Flexibilisierung

Bedeutende Vorhaben innerhalb des Flugzeugbaus, der hier stellvertretend betrachtet werden soll, waren in den achtziger und neunziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts der Entwicklung und Einführung automatisierter Niet-systeme [75], Klebetechniken [47] und Schweißverfahren [136] gewidmet und haben dazu beigetragen, auf dem Gebiet der Fügeoperationen einen neuen Stand der Technik zu erreichen. Nachfolgende Vorhaben beschäftigen sich seit den neunziger Jahren mit einem zweiten wichtigen Aspekt der Montage[1], der *HANDHABUNG* von Bauteilen und Montageverbunden [68, 92, 103, 114].

Hinsichtlich eines Lageregelkreises zur Ausrichtung von Objekten in allen sechs Freiheitsgraden wie in [92] und [130] beschrieben, existieren bisher keine automatisierten Anwendungen. Auch bei erst kürzlich realisierten Projekten handelt es sich um teilautomatisierte Montagestationen, die einen wesentlichen Eingriff des Bedieners in den Fertigungsablauf erfordern. Darüber hinaus beschränkt sich das Positionieren auf eine reine Positionskorrektur. Die Winkel von Objekten werden

[1] LAUCHT [69] und WARNECKE [125] quantifizieren die Anteile von Montagetätigkeiten mit Fügen: 50 %, Handhaben: 43 % und weiteren Hilfsfunktionen: 7 %.

nicht bzw. nur indirekt berücksichtigt, das heißt Winkellagen der Bauteile werden nur anhand von Positionsabweichungen an lokalen Referenzpunkten überprüft. Die Folgen dieses Vorgehens sind unter anderem die Notwendigkeit, daß die Ist-Orientierung der Objekte zu Beginn eines Montageprozesses weitestgehend der Soll-Orientierung entsprechen und darüber hinaus Drehbewegungen während der Fertigung – sofern sie nicht geringfügig sind – vermieden werden müssen.

2.3 Meßsysteme und Meßaufgabe

Vor dem Hintergrund neuer Montagekonzepte entstehen im Bereich der Bauteilhandhabung und -positionierung höhere Anforderung hinsichtlich der Meß- und Positioniergenauigkeiten. Dabei ist in bezug auf Großkomponenten und deren Montage mit Fertigungstoleranzen[1] ΔF_{FT} von

$$\Delta F_{FT} \leq \pm 2{,}0\,mm \tag{1.1}$$

zu rechnen. Diese Vorgaben lassen sich iterativ erreichen, wenn die Wiederholgenauigkeit ΔF_P der Positioniereinheiten etwa

$$\Delta F_P \leq \frac{\Delta F_{FT}}{3} \tag{1.2}$$

beträgt und eine Genauigkeit ΔF_M seitens der Meßgeräte im Bereich von

$$\Delta F_M \leq \frac{\Delta F_P}{10} \tag{1.3}$$

erreicht wird. Dieser Ansatz wurde in [92], [130], [131] und [132] bereits nachgewiesen. Somit läßt sich ein zulässiger Meßfehler von

$$\Delta F_M \leq \pm 0{,}06\,mm \tag{1.4}$$

bestimmen.

Die Lage eines Objektes kann mit Hilfe einer ausreichend großen Anzahl bekannter oder gemessener 3D-Positionen beschrieben werden [130]. Bereits heute gehören prozeßinterne Koordinatenmessungen zu den typischen Meßaufgaben in der Großbauteilmontage, wobei in der Regel optische Verfahren zur Anwendung kommen. Zwei- oder Mehrkamerasysteme ("Photogrammetrie") finden hier nur teilweise Verwendung, da sie so, wie sie für den industriellen Einsatz verfügbar sind, in Handhabung und Auswertung meist mit einem höheren Aufwand verbunden sind als andere Meßsysteme und in bezug auf Großbauteile auch nicht die höchste Genauig-

[1] Je nach Branche und Fertigungsaufgabe variieren die Angaben der Industrie hinsichtlich der Toleranzen. Häufig werden auch $\Delta F_{FT} \leq \pm\, 1{,}0\ mm$ genannt.

keit erreichen. Ein Vorteil besteht jedoch in der Möglichkeit, gleichzeitig, in einem Bild, viele Meßpunkte aufzunehmen. Aus diesem Grund werden Kamerasysteme häufig genutzt, um mit Hilfe von Referenzpunkten Qualitätsprüfungen an Bauteilkonturen vorzunehmen. Darüber hinaus erfordern Bildsysteme keinen festen Standpunkt der Kamera, da anhand kodierter Referenzmarken jeder Abbildung ein Koordinatensystem zugeordnet werden kann. Des weiteren können Messungen auch bei widrigen Umgebungsbedingungen erfolgen. Photogrammetrische Meßsysteme sind deshalb auch im Schiffbau verbreitet. Für mechanisierte oder automatisierte Positionieraufgaben spielen sie innerhalb der Großbauteilmontage derzeit jedoch eine untergeordnete Rolle, weshalb hier nicht näher auf sie eingegangen werden soll.

Eine zweite Gruppe optischer Koordinatenmeßgeräte sind polare Systeme (Abbildungen 2-6 und 2-7). Im Bereich der Großbauteilmontage haben sich *TACHYMETER* [22, 135, 141, 143], vereinzelt noch *THEODOLITE* [82] und *LASER TRACKER* [68, 84, 138, 140] durchgesetzt. Zu ihren Anwendungsfeldern gehören unter anderem die oben genannte turnusmäßige Überprüfung von Vorrichtungen, aber auch das Einrichten und Installieren von Anlagen [140] oder die manuelle Überprüfung von Bauteilgeometrien [140]. Neben diesen Messungen im Sinne einer Qualitätsprüfung und Dokumentation werden auch prozeßbezogene Daten aufgenommen. Dabei haben Laser Tracker in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Während sie zunächst – genau wie Tachymeter [142] – ausschließlich für manuelle Messungen eingesetzt wurden [144], gehören fertigungsintegrierte Systeme heute zum Stand der Technik. Allerdings ist eine automatisierte Rückführung und Verarbeitung der Meßsignale in den Fertigungsprozeß, das heißt ein Bauteil-Lageregelkreis, bisher noch nicht realisiert worden [84, 138]. Das Treffen von Entscheidungen sowie das Einleiten von Maßnahmen obliegt in Art und Qualität jeweils dem Bediener der Anlage. Forschungsansätze hinsichtlich automatisierter Regelkreise haben die technische Umsetzbarkeit aber bereits nachgewiesen [92, 130, 131, 132].

Abbildung 2-6: Tachymeter, verschiedene Ausführungen [A2]

Ein anderes Anwendungsgebiet für optische Koordinatenmeßsysteme zeigt ADFAST (Automation for Drilling, Fastening, Assembly, Systems Integration and Tooling), ein