

Thomas Kuhn · Werner Grimm *Hrsg.*

Lenkverfahren

Eine Einführung in die Theorie und Praxis
der Flugkörperlenkung



Springer Vieweg

Lenkverfahren

Thomas Kuhn · Werner Grimm

Lenkverfahren

Eine Einführung in die Theorie und Praxis
der Flugkörperlenkung

Thomas Kuhn
Heiligenberg, Deutschland

Werner Grimm
University of Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

ISBN 978-3-662-64210-8 ISBN 978-3-662-64211-5 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-64211-5>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2022

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Markus Braun

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Das vorliegende Buch zum Thema Lenkverfahren entstand aus dem Wunsch heraus, die über Jahre weiter entwickelten Inhalte der gleichnamigen Vorlesung an der Universität Stuttgart in ihrer endgültigen, ausgereiften Form zu Papier zu bringen. Die Vorlesung wurde in den neunziger Jahren initiiert von Klaus H. Well, dem ersten Leiter des 1991 gegründeten Instituts für Flugmechanik und Flugregelung (iFR). Die ersten Lehrinhalte beruhten auf den Vorarbeiten von Klaus H. Well im Bereich Flugkörperlenkung am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Seit 2009 besteht die Vorlesung aus einem universitären Anteil (Werner Grimm) und einem externen Lehrauftrag (Thomas Kuhn, Diehl Defence GmbH & Co. KG). Sie ist somit die Synthese aus einer eher theoretischen Sicht der Lenkverfahren und praktischen Anwendungsaspekten, wobei die jahrelange Erfahrung in zahlreichen Projekten zu Lenkflugkörpern und gelenkten Munitionen einfließt. Die Lehrveranstaltung ist in dieser Form dauerhaft am iFR verortet und stellt ein Angebot dar für die Master-Studiengänge Luft- und Raumfahrttechnik sowie Technische Kybernetik.

Bei den Lenkverfahren handelt es sich um ein besonderes Segment aus der allgemeinen Regelungstechnik. Viele Methoden und Verfahren aus der regelungstechnischen Ausbildung und Praxis sind auch für die Flugkörperlenkung anwendbar. Es gibt jedoch eine ganze Reihe von Besonderheiten, die eine separate Betrachtung und Behandlung erfordern. Genau diese Besonderheiten, welche sich auch einem gut ausgebildeten Regelungstechniker nicht ohne weiteres erschließen, bilden den Schwerpunkt sowohl der Lehrveranstaltung „Lenkverfahren“ als auch des vorliegenden Buches. Ein besonderes Anliegen ist die Herleitung der Lenkverfahren

- mit regelungstechnischen Ansätzen und/oder
- flugmechanischen Überlegungen.

Dementsprechend sollte der Leser ein solides Vorwissen in Flugmechanik und Regelungstechnik mitbringen, insbesondere zu den Themen Übertragungsfunktion und Stabilitätskriterien. Die wichtigsten Zielgruppen sind

- Studierende einerseits und
- Berufseinsteiger und Praktiker andererseits,

denen eine vergleichsweise unkomplizierte Einarbeitung in das doch sehr spezielle Thema der Lenkverfahren ermöglicht werden soll. Das Buch soll den Leser mit den wichtigsten Fachbegriffen vertraut machen und ihn so befähigen, weiterführende Literatur wie etwa das Standardwerk von Siouris [4] oder spezielle Fachzeitschriftenartikel zu verstehen. Im günstigsten Fall ist das Buch eine Inspirationsquelle für eigene Anwendungen und Weiterentwicklungen.

Nach aktuellem Wissensstand der Autoren gibt es im deutschsprachigen Raum keine vergleichbare Alternative zur Lehrveranstaltung „Lenkverfahren“. Genauso wenig gibt es entsprechende Fachliteratur in deutscher Sprache. Genau diese Lücke versucht dieses Buch zu schließen. Es ist wie gesagt eine Einführung und kein Nachschlagewerk und verzichtet dementsprechend auf umfangreiche Literaturverzeichnisse.

Naturngemäß liegt der Schwerpunkt der Lenkverfahren für Flugkörper auf den militärischen Anwendungen. Ungeachtet dessen versucht dieses Buch die Verwendung militärischer Termini weitestgehend zu vermeiden und eine möglichst neutrale ingenieurwissenschaftliche Perspektive einzunehmen.

Stuttgart
im Juni 2021

Thomas Kuhn
Werner Grimm

Verallgemeinerte Umkehrfunktion des Tangens

In der Flugmechanik bzw. Flugsimulation kommt häufig folgende Aufgabenstellung vor:
Für gegebene Zahlen x , y ist der Winkel α gesucht, der die zwei Gleichungen

$$x = k \cdot \cos \alpha, \quad y = k \cdot \sin \alpha \quad \text{für} \quad k = \sqrt{x^2 + y^2} > 0$$

erfüllt. Außer im Fall $x = y = 0$ hat die Aufgabe eine eindeutige Lösung im Intervall $-\pi < \alpha \leq \pi$; sie wird im Weiteren bezeichnet mit

$$\alpha = \arctan_2(y, x)$$

Unter der Bedingung $x > 0$ (und nur in diesem Fall!) lässt sich α mit dem gewöhnlichen Arkustangens darstellen: $\alpha = \arctan(y/x)$. Insofern stellt $\arctan_2$ eine Verallgemeinerung des Arkustangens dar. $\arctan_2$ ist keine klassische Elementarfunktion der Mathematik, ist aber in vielen Programmiersprachen unter dem Namen `atan2` vorhanden („four-quadrant inverse tangent“).

Inhaltsverzeichnis

1	Überblick und Grundlagen	1
1.1	Technologische Entwicklung	1
1.2	Lenkflugkörper und Lenkverfahren – Versuch einer Definition	5
1.3	Grundbegriffe der Lenkverfahren	8
1.4	Einteilung der Lenkverfahren	12
1.5	Schnittstellen der Lenkung	14
1.6	Koordinatensysteme der Lenkung	15
1.6.1	Lenkkoordinaten (Guidance Coordinate Frame) $[G]$	16
1.6.2	Bahnsystem $[k]$	17
1.6.3	Körperfestes Koordinatensystem $[f]$	17
1.6.4	Sichtliniensystem $[L]$	18
1.6.5	Geodätische $[D]$ und Geozentrische $[C]$ Koordinaten	19
1.6.6	Inertialsystem $[I]$	21
1.6.7	North East Down $[N]$	23
2	Proportionalnavigation	25
2.1	Skalare Vorbetrachtung	25
2.2	Dynamik der Lenkschleife	26
2.3	Störeinflüsse auf die Lenkung	31
2.4	Erweiterung auf drei Dimensionen	32
2.5	Simulationsbeispiel	35
2.6	Zusammenfassung	39
2.7	Nachtrag: Optimale Wahl der Lenkverstärkung	41
3	Zieldeckungslenkung	45
3.1	Zieldeckungslenkung in der Vertikalebene	45
3.1.1	Entwurfsmodell	45
3.1.2	Lenkkonzept	47
3.1.3	Vorsteuerung	48
3.1.4	Lenkung zum Erreichen der Zieldeckung	49
3.1.5	Simulationsergebnisse	51

3.2	Zieldeckungslenkung in drei Dimensionen	54
3.2.1	Entwurfsmodell	55
3.2.2	Lenkkonzept	55
3.2.3	Vorsteuerung	56
3.2.4	Lenkkommando zum Erreichen der Zieldeckung	57
3.2.5	Simulationsergebnisse	58
4	Required-Velocity-Lenkung	63
4.1	Beschreibung des Lenkprinzips	63
4.2	Die „Required Velocity“ über ruhender, flacher Erde	65
4.3	Die „Required Velocity“ über runder, rotierender Erde	67
4.4	Lenkung einer ballistischen Rakete: Lambert-Guidance	71
4.5	Simulationsbeispiel	76
4.6	Flugzeit der ballistischen Rakete	81
5	Realisierungsaspekte	87
5.1	Missionssteuerung	88
5.2	Zielfilter	89
5.3	Kommandierung des Flugreglers	91
5.4	Spezielle Lenkgesetze	94
5.4.1	Bahnenlenkung	95
5.4.2	Trajectory Shaping	105
5.4.3	Augmented Guidance	107
5.4.4	Aufschlagvorhersage	110
5.4.5	Prädiktive Lenkung	116
5.4.6	Modellprädiktive Lenkung	123
5.5	Body Motion Isolation	133
A	Algorithmische Werkzeuge	141
B	Simulationsmodelle	157
Literatur		171
Stichwortverzeichnis		173

Abkürzungsverzeichnis

BTT	Bank to Turn
ECEF	Earth Centered Earth Fixed
ECI	Earth Centered Inertial
GPS	Global Positioning System
IMU	Inertial Measurement Unit
LOS	Line of Sight
NED	North-East-Down
PIP	Predicted Impact Point
PN	Proportionalnavigation
STT	Skid to Turn
ZEM	Zero Effort Miss

Zusammenfassung

Mit diesem Kapitel wird dem Leser ein erster Überblick zu dem Themenkomplex gegeben. Zunächst wird mit der Darstellung der Geschichte der Lenkflugkörper zugleich die thematische und die historische Einordnung vorgenommen. Dabei wird die Schwierigkeit einer abgrenzenden Definition der Lenkung bzw. der Lenkverfahren vom Gesamtkomplex der Lenkflugkörpertechnologien deutlich. Ungeachtet dieser Schwierigkeit wird eine praktisch anwendbare Definition der Lenkung formuliert. Mit dieser Definition wird zugleich eine Klassifikation der Lenkverfahren unter Bezugnahme auf die militärischen Anwendungen vorgenommen. Anschließend werden in einem stark vereinfachten Schema die wichtigsten, zum weiteren Verständnis erforderlichen Begriffe aus der Relativgeometrie vermittelt, die den Lenkverfahren zugrunde liegt. Schließlich wird die Lenkung als Teil eines Regelkreises, der so genannten Lenkschleife vorgestellt und die im Weiteren verwendeten Koordinatensysteme diskutiert.

1.1 Technologische Entwicklung

Flugkörper sind nach allgemeinsprachlichem Verständnis unbemannte, zum einmaligen Gebrauch bestimmte, von Menschenhand geschaffene oder zumindest eingesetzte Flugobjekte. Streng genommen beginnt deren Geschichte mit dem ersten Steinwurf in grauer Vorzeit und setzt sich über Speere, Pfeile, Kanonenkugeln und Geschosse fort. Dieses Buch beschränkt sich auf die Lenkflugkörper, also gelenkte Flugkörper.

Die ersten Prototypen in Form von unbemannten Flugzeugen, die sich in diese Kategorie einordnen lassen, entstanden in der Zeit des Ersten Weltkriegs [5]. Wir finden erste rudimentäre Techniken für autonomen Flug, beispielsweise die Unterstützung der Kurssteuerung durch einen Kreiselkompass. Die Reichweite wurde durch ein Zählwerk eingestellt.

Der Motor wurde nach der voreingestellten Umdrehungszahl abgestellt und die Tragflächen wurden abgeworfen, wodurch der Sturzflug der Nutzlast zum Boden ausgelöst wurde.

Die eigentliche Ära des militärischen Einsatzes von Lenkflugkörpern begann in den letzten Jahren des Zweiten Weltkrieges. Es gab dazu etliche Entwicklungen auf allen Seiten. In Deutschland wurde erstmalig das Verfahren der Zieldeckungslenkung umgesetzt, um Lenkbomben ins Ziel zu bringen [6]. Die Bomben wurden wahlweise per Funk oder Draht ferngelenkt, der Schütze wurde durch farbige Leuchtsätze am Heck des Flugkörpers unterstützt. Am Beispiel der Lenkbomben wird deutlich, dass ein eigener Antrieb aus technischer Sicht nicht zum definierenden Merkmal des Lenkflugkörpers zählt.

Ebenfalls am Ende des Zweiten Weltkrieges kamen die ersten Marschflugkörper zum Einsatz [9]. Sie dienten zur Bekämpfung stationärer Ziele, die bis über 250 km entfernt sein konnten. Die Lenkung beruhte zunächst auf inertialer Navigation mit den entsprechenden Sensoren wie z. B. Lagekreisel und barometrischen Höhenmessern. Die Reichweite wurde wieder mithilfe eines Zählwerks eingestellt, indem nach einer voreingestellten Umdrehungszahl einer kleinen Luftschraube der Endanflug eingeleitet wurde. Auch mit der später entwickelten Funkfernlenkung blieb die Präzision im Zielgebiet jedoch mangelhaft.

Die ersten ballistischen Flüssigkeitsraketen wurden in der Schubphase mit einem einfachen Required-Velocity-Verfahren gelenkt [1]. Die Reichweite wurde durch den Zeitpunkt der Brennschlusskommandierung eingestellt. Die Zielrichtung wurde vor dem Start der Rakete justiert, indem eine speziell gekennzeichnete Heckflosse in Richtung des Ziels gedreht wurde. Trotzdem waren die Trefferfehler immer noch erheblich, so dass die Geräte nur zur Bekämpfung ausgedehnter, quasi-stationärer Ziele infrage kamen. Eine Weiterentwicklung stellen Raketen zur Bekämpfung von Luftzielen dar; den ersten Prototyp gab es ebenfalls in den letzten Jahren des Zweiten Weltkrieges [7]. Die Lenkung beruhte auf der Einstellung des Kollisionskurses. Für die Zielverfolgung dachte man erstmals über den Einsatz eines Infrarot-Suchkopfs nach. Auch wenn der militärische Nutzen letztlich begrenzt war, sehen wir hier den Ausgangspunkt sämtlicher Entwicklungen taktischer wie strategischer militärischer Raketen, aber auch der zivilen Raumfahrt. Es ist festzustellen, dass die Unterscheidung von Rakete und Lenkflugkörper aus der Perspektive der Lenkverfahren nicht relevant ist. Während die militärische Nomenklatur tatsächlich zwischen Lenkflugkörper und Rakete unterscheidet, so ist eine gelenkte Rakete (und sei es „nur“ ein Required-Velocity-Verfahren während der Schubphase) aus Sicht der Lenkverfahren grundsätzlich ein Lenkflugkörper.

Mit diesen historischen Beispielen aus dem Zweiten Weltkrieg sind die heute bekannten, wesentlichen Klassen von Lenkflugkörpern bereits vorgezeichnet bzw. erkennbar. Aus technologischer Sicht fehlte es diesen Lenkflugkörpern an besseren Sensoren bzw. Verfahren zur Navigation, Zielvermessung und Lenkung. Autonome, zielsuchende Lenkverfahren mit entsprechenden Zielsuchköpfen konnten noch nicht realisiert werden. An dieser Stelle setzten die aufwändigen Technologieentwicklungen des Kalten Krieges an.

In den fünfziger Jahren wurden große Fortschritte bei der Inertialnavigation erzielt. Hochpräzise (und heute nicht mehr zu bezahlende) Navigationssysteme ermöglichten die ers-

ten Marschflugkörper (Cruise Missiles), die in der Lage waren, nukleare Gefechtsköpfe über tausende von Kilometern mit einer für taktische Ziele ausreichenden Genauigkeit zu verbringen. Mit den ersten Erfolgen der Raumfahrt demonstrierten die Gegner zugleich ihre militärischen Fähigkeiten auf dem Gebiet der interkontinentalen ballistischen Raketen. Von diesen Forschungs- und Entwicklungsergebnissen profitierte auch die Lenkflugkörper-technologie. Ein entscheidender Schritt zum heutigen Lenkflugkörper war jedoch die Entwicklung der Zielsuchköpfe. Auf diese Weise gelang es, erste autonom bzw. halbautonom gelenkte Flugkörper gegen bewegte Ziele zu realisieren. Die ersten Infrarotsuchköpfe waren noch ungekühlt und relativ unempfindlich bzw. aufgrund ihrer Breitbandigkeit einfach zu stören. Mit den gekühlten Detektoren wurden immer leistungsfähigere Systeme realisierbar. Bis in die 70er-Jahre wurden sämtliche Funktionen der Lenkung und Regelung von Lenkflugkörpern mittels analoger Elektronik realisiert. In einem Artikel von Rollefson aus dem Jahre 1957 [10] wird deutlich, dass gegen Ende der 50er-Jahre alle bis heute wesentlichen Lenkflugkörpertechnologien bereits bekannt waren und weitestgehend beherrscht wurden. So waren als luftatmende Triebwerke (Engines) Turbojet und Ramjet ebenso bekannt wie die Raketenantriebe (Rocket Motor) mit festen und flüssigen Treibstoffen. Für die Feststofftriebwerke wurde bereits die Herstellung gewünschter Schubprofile beherrscht. Ebenso wurden schon damals mehrstufige Raketenantriebe verwendet. Zur Lenkung wurden die bis heute verwendeten aerodynamischen Ruder und Strahlruder, aber auch Korrekturtriebwerke genutzt. Für ballistische Raketen wurden Inertialnavigationssysteme und Bahnlenkverfahren verwendet. Die Beamrider-Lenkung wurde bereits realisiert. Auch anspruchsvollere Lenkverfahren wurden damals umgesetzt. Allerdings wurden die hochwertigen Analogrechner zur Berechnung der Lenkkommandos nicht im Lenkflugkörper, sondern im wieder verwendbaren Lenkstand untergebracht und die Lenkkommandos an den Lenkflugkörper per Funk übertragen, weswegen die Lenkflugkörper jener Tage relativ einfach durch funktechnische Maßnahmen zu stören waren. Schließlich werden in [10] bereits semiaktive und aktive Radarsuchköpfe und passive Infrarotsuchköpfe erwähnt. Allerdings wird nicht verschwiegen, dass die technologischen Herausforderungen dieser Zeit in der eingeschränkten Verfügbarkeit geeigneter Miniaturkreisel, Beschleunigungsmesser, Zieldetektoren und Signalverarbeitung bestanden: „It is necessary to push the state of the art in all these fields, and in so doing, it is inevitable that newly developed components will be used which are neither as rugged nor as well engineered as ones which had years of testing.“

In dieser Blütephase der Lenkflugkörper Ende der 50er-Jahre bildeten die verwendeten Technologien jeweils den allerneuesten Stand der damaligen Technik ab und waren entsprechend noch keineswegs ausgereift. Damit wurde die Zuverlässigkeit zu einer der zentralen Herausforderungen an die Lenkflugkörper-technologie. In [10] wurde dazu die Frage aufgeworfen, warum Lenkflugkörper gelegentlich in Flugtests versagen. Die Antwort darauf: Weil zum einen zahlreiche völlig neue Komponenten gleichzeitig, autonom und für die Dauer der gesamten Mission zuverlässig funktionieren müssen und zum anderen die Bedingungen, denen diese Komponenten während des Fluges ausgesetzt sind, nicht einfach zu beherrschen sind. Speziell erwähnt werden die schlecht vorhersagbaren Vibrationen

während des Fluges. Es wird zusammenfassend festgestellt, dass die zugrundeliegenden wissenschaftlichen Prinzipien der Lenkflugkörpertechnologien vollständig bekannt sind und keine wissenschaftlichen Durchbrüche mehr notwendig sind, um Lenkflugkörper zu realisieren. Allerdings stand den Lenkflugkörpertechnologien zu dieser Zeit noch ein weiter Weg der Reifung bevor, insbesondere Forschungsarbeiten auf den Gebieten neuer Materialien, Treibstoffe, Detektoren, Sensoren und der Signalverarbeitung. In diese Phase fallen Ereignisse wie die Wiederbewaffnung Deutschlands, die Übernahme der Lizenzfertigung für den Lenkflugkörper Sidewinder durch das Bodenseewerk Gerätetechnik (ab 1989 Diehl) und der Beginn der Forschungsarbeit zu Lenkverfahren für Flugkörper durch die Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR, später DLR).

Mit der Verfügbarkeit von Mikroprozessoren in den späten 70er-Jahren hielt die digitale Elektronik Einzug in die Lenkflugkörper. Mit einem Male wurden komplexe Algorithmen zur Signalverarbeitung realisierbar. So entstanden Suchköpfe mit der Fähigkeit zur Bildverarbeitung, und anspruchsvolle Lenkverfahren konnten nunmehr direkt im Flugkörper implementiert werden, was die Störbarkeit deutlich reduzierte. Ebenso konnten leistungsfähigere bzw. kostengünstigere Navigationsmethoden (Strapdown) und Regelungsstrategien verwendet werden.

Auch die Sensorik konnte in den letzten 40 Jahren deutlich verbessert werden. Immer präzisere Detektoren wurden möglich, miniaturisierte, robuste und zugleich präzise Inertialsensoren wurden verfügbar, und die Komponentenkosten konnten immer weiter reduziert werden. Gleichzeitig wurden Technologien, die zunächst nur den militärischen Anwendungen – insbesondere den Lenkflugkörpern – vorbehalten waren, zunehmend der zivilen Nutzung zugeführt. Bekanntestes Beispiel ist das Global Positioning System (GPS). Aber auch der zunehmende Einsatz von Inertialsensoren in der Automobilindustrie (Electronic Stabilization Program – ESP) bis hin zu den Fähigkeiten heutiger Smartphones ist letzten Endes auf die Forschungs- und Entwicklungsergebnisse für Lenkflugkörper zurückzuführen. Auch sollte die aufgrund der Miniaturisierung möglich gewordene Anwendung der Lenkflugkörpertechnologien auf rohrverschossene Projektile, so genannte Lenkmunition, erwähnt werden.

In den 80er-Jahren entstanden die ersten Systemdemonstratoren für eine völlig neue Fähigkeit von Lenkflugkörpern, nämlich der Bekämpfung ballistischer Raketen durch Direkttreffer – so genannte „Hit to Kill“ Flugkörper. In diesen Jahren entstanden darüber hinaus zahllose neue Flugkörpertypen, oftmals Speziallösungen für bestimmte Anwendungsgebiete. Zugleich erweiterte sich die technologische Wissensbasis stetig, jedoch gekennzeichnet durch ein eher quantitatives als ein qualitatives Wachstum. Als charakteristisch für diese Epoche kann gelten, dass die anspruchsvollen Technologien zur Entwicklung und Fertigung von Lenkflugkörpern nur von den entwickelten Industriestaaten auf beiden Seiten des Eisernen Vorhangs beherrscht wurden. Auch gingen die Großmächte des Kalten Krieges mit Rüstungsexporten noch relativ restriktiv um. Zwar wurden Lenkflugkörper exportiert, die technologischen Fähigkeiten zu deren Weiter- und Neuentwicklung beschränkten sich jedoch auf relativ wenige Staaten.

Das aktuelle Kapitel der Geschichte der Lenkflugkörper hat mit dem Ende des Kalten Krieges begonnen und ist durch die weltweite Einführung und tatsächliche Anwendung von Lenkflugkörpern in militärischen Konflikten gekennzeichnet. Waren die Konflikte, in denen Lenkflugkörper zum Einsatz kamen, bis dahin überschaubar (Korea, Vietnam, Falkland, Iran/Irak, Israel/Syrien/Ägypten), verbreiteten sich durch das Ende des Kalten Krieges Lenkflugkörper und ihre Technologien teilweise unkontrolliert über die Welt, und Lenkflugkörper wurden zunehmend auch in lokalen Konflikten bzw. von Terroristen eingesetzt. Gleichzeitig wurden in diesen Jahren weltweit neue Flugkörperprogramme realisiert. Durch immer bessere und kostengünstigere Schlüsselkomponenten konnten sich die Lenkflugkörper neue Anwendungsgebiete erschließen. Durch die Anwendung verfügbarer Technologien ist es inzwischen gelungen, sehr präzise Lenkflugkörper in die artilleristische Anwendung zu bringen und für deutlich unter 100.000 US\$ pro Stück in großer Anzahl herzustellen. Noch kostengünstiger sind moderne infanteristische Lenkflugkörper.

Dagegen kann aus der Forschung zu den Lenkverfahren selbst nicht viel qualitativ Neues berichtet werden. Natürlich sind die entscheidenden Flugkörperkomponenten mit den Jahren leistungsfähiger, leichter, robuster und billiger geworden. Und natürlich wird weltweit noch immer geforscht, interessanterweise kommen zahlreiche einschlägige Veröffentlichungen zu neuen Lenkverfahren aus China, Indien und dem Iran. Heute besteht angesichts einer für den einzelnen Fachmann unüberschaubaren Vielfalt weltweit realisierter Flugkörperprojekte und Veröffentlichungen eher die Gefahr, längst verfügbare Lösungen, Methoden oder Verfahren zu übersehen und im besten Falle wiederzuentdecken. Die jeweiligen nationalen Vorschriften zur Geheimhaltung sind dabei einer um Vollständigkeit und Systematik bemühten wissenschaftlichen Betrachtung der Thematik mitunter hinderlich.

1.2 Lenkflugkörper und Lenkverfahren – Versuch einer Definition

Bevor versucht wird, eine Definition für den Begriff der Lenkung zu formulieren, soll das Anwendungsgebiet selbst, nämlich die Lenkflugkörper, kurz umrissen werden. Es handelt sich nach allgemeinem Verständnis bei Lenkflugkörpern um unbemannte Fluggeräte, die als Waffe eingesetzt werden. Das Vorhandensein einer Lenkung, also die Anwendung der Lenkverfahren bildet das definierende Merkmal. Anhand von Abb. 1.1 soll der Aufbau eines typischen Lenkflugkörpers dargestellt werden. Wie jedes Fluggerät verfügt auch der Lenkflugkörper über eine Zelle, in bzw. an welche sämtliche Komponenten bzw. Subsysteme integriert werden. Von außen sichtbar sind die aerodynamisch wirksamen Flächen wie Flügel und Ruder. Die Ruder werden als Stellglieder der Flugregelung von einem Ruderstellsystem angetrieben.

Lenkflugkörper verfügen in der Regel über ein eigenes Triebwerk, das zumeist als Raketenantrieb ausgeführt ist. Es gibt aber auch Lenkflugkörper mit luftatmenden Triebwerken wie Turbinen oder Ramjets. Darüber hinaus gibt es gelenkte Munitionen, die ihre Anfangsgeschwindigkeit durch den Verschuss aus einer Rohrwaaffe gewinnen. Im militärischen

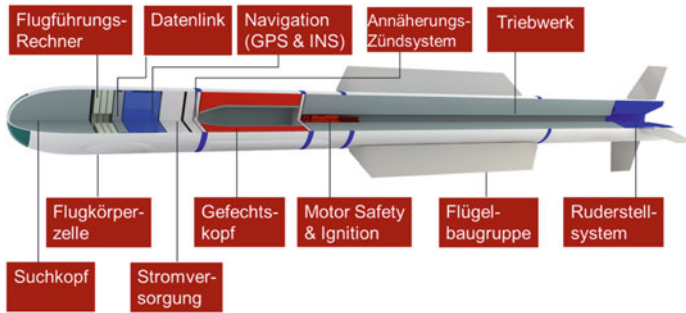


Abb. 1.1 Schematischer Aufbau eines Lenkflugkörpers

Sprachgebrauch sind diese Munitionen keine Lenkflugkörper – aus technischer Sicht aber schon. Genauso gibt es Lenk- und Gleitbomben, die aus technischer Sicht, auch wenn sie über keinen eigenen Antrieb verfügen, als Lenkflugkörper zu bezeichnen sind. Lenkflugkörper können über einen Gefechtskopf als Nutzlast verfügen. Zur Zündung bei Zielannäherung werden entsprechende Sicherungs- und Zündsysteme eingesetzt. Es gibt aber auch Lenkflugkörper, deren Wirkung ausschließlich auf der beim Direkttreffer umgesetzten kinetischen Energie beruht. Lenkflugkörper benötigen zwingend Inertialsensorik. Moderne Lenkflugkörper verwenden digitale Flugführungsrechner. Zielsuchende Lenkflugkörper verfügen über einen Suchkopf. Sämtliche elektrischen bzw. elektronischen Komponenten und Subsysteme benötigen selbstverständlich eine entsprechende Stromversorgung, die bei Lenkflugkörpern vorwiegend in Form von Thermalbatterien ausgeführt wird.

Üblicherweise werden Flugkörper nach dem Ort ihres Missionsbeginns bzw. ihres Trägersystems und dem Ort ihres Ziels klassifiziert. Als zusätzliches Merkmal wird die relative Reichweite verwendet. So wird beispielsweise der Flugkörper IRIS-T (Infra Red Image Seeker – Thrust Vector Controlled) treffend als Luft-Luft-Flugkörper kurzer Reichweite klassifiziert (siehe Abb. 1.2). Im Gegensatz dazu wird die gelenkte Artillerierakete GMLRS (Guided Multiple Launch Rocket System) als Boden-Boden-Flugkörper mittlerer Reichweite bezeichnet. Alternativ können Flugkörper auch nach ihrer Agilität, d.h. ihrer Manövrierfähigkeit klassifiziert werden. Die sehr agile IRIS-T würde dann als typischer Lenkflugkörper bezeichnet werden. Dagegen kann die GMLRS, obwohl sie über eine Lenkung verfügt, im Wesentlichen als ballistische Rakete angesehen werden. Im Englischen ist hier sehr treffend die Unterscheidung zwischen Missile und Rocket gegeben. Schließlich können Flugkörper auch nach dem verwendeten Lenkverfahren klassifiziert werden. Die IRIS-T ist – gemäß ihrer Bezeichnung – ein mittels passivem Infrarotsuchkopf gelenkter Flugkörper. Die GMLRS ist ein mittels GPS/INS gelenkter Flugkörper. Lenkung wird unter der Abkürzung GNC („guidance, navigation, and control“) häufig in einem Zug mit Navigation und Regelung genannt. Die Bedeutung der einzelnen Bereiche und ihre Wechselwirkung sind offensichtlich. Das folgende Zitat aus [8] fasst die Rolle von Lenkung, Regelung und Navigation zusammen:



(a) IRIS-T



(b) GMLRS

Abb. 1.2 Beispiele für Flugkörperklassen

Navigation is concerned with determining where you are relative to where you want to be,

Guidance with getting yourself to your destination,
and **Control** with staying on track.

Die Definition dieser drei Begriffe besagt, dass sich die Navigation mit der Bestimmung der eigenen Position relativ zum Ziel befasst. Die Lenkung ist dafür verantwortlich, dass das Ziel auch erreicht wird, während die Regelung die Einhaltung des von der Lenkung vorgegebenen Pfades sicherstellt. Im Sinne dieser Definition sind die in unseren Kraftfahrzeugen verwendeten, sogenannten Navigationssysteme mehr als das, sie übernehmen nämlich neben der Navigation auch noch die Aufgabe der Lenkung, indem sie uns den Weg zum Ziel weisen. Dem in unbekannter Umgebung dem Navigationssystem ausgelieferten unmündigen Fahrer ist nur noch die Aufgabe der Regelung geblieben, nämlich den Wagen sicher (und unter Beachtung der Verkehrsregeln) auf dem von der Lenkung gewiesenen Pfad zu halten. Weicht der Fahrer von diesem ab, so ist es die Aufgabe der Lenkung (in diesem Beispiel also des Navigationssystems), einen alternativen Pfad zu erarbeiten.

Die Lenkung ist definitionsgemäß dafür verantwortlich, dass der Flugkörper ein bestimmtes Ziel erreicht. Der Begriff „Ziel“ ist als Missionsziel im weitesten Sinne zu verstehen. Bei militärischen Anwendungen geht es um die Annäherung an ein gegnerisches Objekt, also ein Ziel im engeren Sinne. In der zivilen Raumfahrt kann das Ziel im Sinne der Lenkung darin bestehen, eine Rakete auf eine gewünschte Umlaufbahn zu bringen. Um das zu erreichen, erzeugt die Lenkung ein Lenkkommando in Form von Sollwerten für bestimmte Bewegungsgrößen, z.B. eine kommandierte Beschleunigung oder eine kommandierte Lage. Der Algorithmus, der das Lenkkommando aus geeigneten Messwerten berechnet, heißt Lenkgesetz. Genau wie ein Regelgesetz wird ein Lenkgesetz nicht nur einmal ausgewertet, sondern mit einer festgelegten Taktrate ständig aktualisiert. Das Lenkgesetz kann eine einfache Formel sein. Es kann aber auch ein komplizierter Algorithmus sein, der intern die Trajektorie bis zum Erreichen des Ziels plant (Bahnplanung).

Die Rolle der Regelung im Zusammenspiel mit der Lenkung ist offensichtlich. Sie muss dafür sorgen, dass das Lenkkommando in Form einer kommandierten Bewegungsgröße umgesetzt wird. Regelungstechnisch ausgedrückt, muss die tatsächliche Größe, der Istwert, dem Kommando, dem Sollwert, folgen. Das Regelgesetz berechnet dazu aus der Regeldifferenz ein geeignetes Steuerkommando. Die eigentliche Eingabegröße der Lenkung ist die Relativgeometrie, also die augenblickliche Position und Geschwindigkeit sowohl des Ziels als auch des Flugkörpers. Ebenso eingängig ist das Zusammenspiel der Lenkung mit der Navigation. Nur wenn die eigene Position und Geschwindigkeit (relativ zum Ziel) bekannt sind, kann ein geeigneter Weg zum Ziel bestimmt werden. Die Funktionen Lenkung (Guidance), Navigation und Regelung (Control) werden nicht nur unter der Abkürzung GNC zusammengefasst, sondern sind in der praktischen Anwendung aufgrund der engen Verzahnung nur schwer voneinander abzugrenzen. Für die GNC-Funktionen gilt:

- Sie teilen sich die Rechenkapazität des Bordrechners.
- Sie müssen hinsichtlich des Datenaustausches und der erforderlichen Ein- und Ausgabedaten aufeinander abgestimmt werden.
- Sie können auf die gleichen Sensoren zugreifen. Z. B. versorgt die Inertial Measurement Unit (IMU) eines Flugkörpers sowohl die Navigation als auch die Regelung mit den gemessenen Beschleunigungen und Drehraten.
- Lenkung, Regelung und Navigation müssen im digitalen Betrieb bzgl. der Taktzeit aufeinander abgestimmt werden.
- Die Entwurfsanforderungen an Lenkung, Regelung und Navigation sind zwingend voneinander abhängig. So ergeben sich beispielsweise aus der Lenkung Anforderungen an die Regelgüte.

Schließlich können Lenkung, Navigation und Regelung auch Entwurfsmethoden gemeinsam haben. So wird z. B. gezeigt, wie man mit dem regelungstechnischen Entwurfsverfahren der EA-Linearisierung Flugkörperlenkgesetze herleiten kann. Umgekehrt ist modellprädiktive Regelung eng verwandt mit Lenkung auf der Grundlage interner Bahnplanung. Schließlich kommt in der Navigation die Kalman-Filterung zur Sensordatenfusion genauso zum Einsatz wie in der Lenkung zur Filterung der Zieldaten.

1.3 Grundbegriffe der Lenkverfahren

Hier sollen die zum Verständnis der Lenkverfahren benötigten Begriffe vorab kurz erklärt werden. Um dies besonders anschaulich zu halten, wird in diesem Kapitel, wie in Abb. 1.3 gezeigt, zunächst eine einfache Darstellung in der Ebene verwendet. Die Erweiterung der gleichen Begriffe und Zusammenhänge auf den Raum unter Verwendung der Vektordarstellung erfolgt in einem späteren Kapitel. Den ersten und wichtigsten Begriff stellt das **inertiale Koordinatensystem** dar. Sämtliche der nachfolgend dargestellten Methoden und Verfahren