

VEREIN  
DEUTSCHER  
INGENIEURE

Motion-Control-Systeme  
mit ungleichmäßig übersetzenden Getrieben  
Nutzeffekte und Realisierungsaspekte  
  
Motion control systems  
with non-uniform translating mechanism  
Benefits and implementation aspects

VDI 2742

Ausg. deutsch/englisch  
Issue German/English

Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.

The German version of this standard shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.

Inhalt	Seite
Vorbemerkung .....	2
Einleitung .....	2
<b>1 Anwendungsbereich</b> .....	4
<b>2 Formelzeichen, Abkürzungen und Indizes</b> .....	4
<b>3 Aufbau eines Antriebsstrangs mit Motion-Control-System (MCS)</b> .....	10
<b>4 Nutzeffekte mit ungleichmäßig übersetzenden Getrieben</b> .....	16
4.1 Übersicht .....	16
4.2 Bewegungsübertragung und Wandlung der Bewegungsart .....	20
4.3 Bewegungsbegrenzung durch Totlagen .....	23
4.4 Gliedführung .....	24
4.5 Antriebsentlastung bei statischer Betriebslast .....	27
4.6 Antriebsentlastung bei dynamischer Betriebslast .....	28
<b>5 Dimensionierung des elektrischen Antriebssystems</b> .....	37
5.1 Erstellung eines Anforderungsprofils .....	37
5.2 Vereinfachte Vorauswahl von Motoren und Reduziergetrieben .....	40
5.3 Vertiefte Optimierung der Übersetzung des Reduziergetriebes .....	47
5.4 Kontrollrechnung .....	53
<b>6 Regelung von elektromechanischen Antriebssystemen</b> .....	57
6.1 Physikalische Modellbildung .....	58
6.2 Reglerdimensionierung, Reglerstruktur und Stabilität .....	60
6.3 Vorsteuerung bei gleichmäßiger Übersetzung .....	66
6.4 Regelungsentwurf mit dynamischer Momentenvorsteuerung beim Antrieb von U-Getrieben .....	69
Schrifttum .....	77

Contents	Page
Preliminary note .....	2
Introduction .....	2
<b>1 Scope</b> .....	4
<b>2 Symbols, abbreviations, and indices</b> .....	4
<b>3 Design of a drive train with motion control system (MCS)</b> .....	10
<b>4 Efficiencies with non-uniform translating mechanisms</b> .....	16
4.1 Overview .....	16
4.2 Motion transmission and transformation of the motion type .....	20
4.3 Limitation of motion due to dead-centre positions .....	23
4.4 Link guidance .....	24
4.5 Drive relief under static operating conditions .....	27
4.6 Drive relief under dynamic operating conditions .....	28
<b>5 Dimensioning of the electric drive system</b> .....	37
5.1 Creation of a requirements profile .....	37
5.2 Simplified preselection of motors and reduction gearboxes .....	40
5.3 In-depth optimization of the reduction gear ratio .....	47
5.4 Check by calculation .....	53
<b>6 Control of electromechanical drive systems</b> .....	57
6.1 Physical modelling .....	58
6.2 Controller dimensioning, controller structure, and stability .....	60
6.3 Feedforward control with uniform transmission ratio .....	66
6.4 Control design with dynamic torque feedforward control for the drive of non-uniform translating mechanisms .....	69
Bibliography .....	77

VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung (GPP)  
Fachbereich Getriebe und Maschinenelemente

VDI-Handbuch Getriebetechnik I: Ungleichförmig übersetzende Getriebe

## Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen ([www.vdi.de/richtlinien](http://www.vdi.de/richtlinien)), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Weitere aktuelle Informationen sind im Internet abrufbar unter [www.vdi.de/2742](http://www.vdi.de/2742).

## Einleitung

Ungleichmäßig übersetzende Getriebe, z.B. Koppelgetriebe mit Dreh- und Schubgelenken, Kurvengetriebe, Unrund-Zahnradpaare und vielfältige andere Bauformen, sind klassische mechanische Mittel zur Erzeugung komplexer Bewegungsabläufe von Arbeitsorganen und gewünschten Kraftwirkungen in Verarbeitungsmaschinen. Sie sind damit oft das leistungs- und marktstellungsbestimmende „Herz“ einer Maschine zur Erfüllung eines bestimmten technologischen Prozesses.

Andererseits eignen sich mit ihrer heutigen Leistungsfähigkeit in vielen Fällen auch lagegeregelter Servoantriebe mit programmierter Bewegungssteuerung – sogenannte „Motion-Control-Systeme“ (abgekürzt MCS) oder „gesteuerte Antriebe“ – ganz ausgezeichnet zur Lösung von anspruchsvollen Bewegungsaufgaben. Gegenüber den klassischen getriebetechnischen, rein mechanischen Lösungen bieten solche Antriebe einerseits die Möglichkeit der dezentralen Anordnung mehr oder weniger direkt am bewegten Arbeitsorgan und andererseits vor allem den entscheidenden Vorteil der größeren Flexibilität durch schnelle und einfache Änderbarkeit von Bewegungsabläufen. Als sogenannte „elektronische Kurvenscheiben“ werden MCS deshalb zunehmend auch in schnellen Verarbeitungsmaschinen eingesetzt. Manchmal verdrängen sie dabei klassische getriebetechnische Lösungen, meist aber entstehen ganz neue, eben flexible Antriebskonzepte, die rein getriebetechnisch nur sehr aufwendig oder überhaupt nicht möglich gewesen wären.

Es gibt jedoch nach wie vor auch technologische Prozesse und Maschinen, bei denen eine mechanische Lösung und ein Antrieb mit konstanter Win-

## Preliminary note

The content of this standard has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the standard VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this standard without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions ([www.vdi.de/richtlinien](http://www.vdi.de/richtlinien)) specified in the VDI Notices.

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this standard.

Further current information is available on the Internet at [www.vdi.de/2742](http://www.vdi.de/2742).

## Introduction

Non-uniform translating mechanisms, e.g., linkages with rotational and prismatic joints, cam mechanisms, non-circular gear pairs, and many other designs, are classic mechanical means for generating complex motion sequences of working elements and desired force effects in processing machines. They are thus often the performance and market position-determining “heart” of a machine for fulfilling a specific technological process.

On the other hand, position-controlled servo drives with programmed motion control – so-called “motion control systems” (abbreviated MCS) or “controlled drives” – are in many cases also very well suited to solving demanding motion tasks with their current performance. Compared to the classic purely mechanical mechanism, such drives offer, on the one hand, the possibility of decentralised arrangement more or less close to the moving working element and, on the other hand, above all, the decisive advantage of greater flexibility due to the ability to change motion sequences quickly and easily. As so-called “electronic cams”, MCS are therefore increasingly being used in high-speed processing machines. Sometimes they replace classic gear solutions, but usually they create completely new, flexible drive concepts that would have been very difficult or even impossible to achieve using pure mechanism technology.

However, there are still technological processes and machines where a mechanical solution and a drive with constant angular speed and possibly a

kelgeschwindigkeit und eventuell mit Schwungrad völlig ausreichen.

Häufig werden ungleichmäßig übersetzende Getriebe und gesteuerte Antriebe nur als sich gegenseitig ausschließende Konkurrenten gesehen. Gelegentlich kann aber durchaus auch eine Kombination eines MCS mit einem ungleichmäßig übersetzenden Getriebe anstelle einer rein linearen Bewegungsübertragung vom Motor bis zum Arbeitsorgan eine besonders günstige Lösung darstellen. Dabei sind verschiedene Wege zur Entstehung eines solchen kombinierten Gesamtsystems möglich.

Eine typische Ausgangssituation besteht z.B. darin, dass in einer Maschine ein vorhandenes ungleichmäßig übersetzendes Getriebe durch eine gemeinsame Hauptwelle aller Baugruppen der Maschine mit mehr oder weniger konstanter Winkelgeschwindigkeit angetrieben wird, und dieses Getriebe – so wie es ist – beibehalten werden, aber nun einen eigenen, individuell gesteuerten Antrieb erhalten soll. Dabei ist das Motiv in der Regel der Gewinn an Flexibilität, z.B. zur besseren Anpassung des Bewegungsablaufs an die Anforderungen des technologischen Prozesses, zur einfacheren Umstellung auf unterschiedliche Produktionsparameter und/oder, um im laufenden Betrieb gezielt auf Störungen oder Sonderbetriebszustände reagieren zu können.

Bei Neuentwicklungen ist der Ablauf im Allgemeinen umgekehrt. Zunächst wird grundsätzlich über die Antriebsart entschieden und dabei gegebenenfalls festgelegt, dass – z.B. wegen seiner Flexibilität – ein MCS eingesetzt werden soll. In der Regel wird dann im Weiteren vorgesehen, dass der Motor entweder das Arbeitsorgan direkt antreibt oder aber über gleichmäßig übersetzende Getriebe wie Untersetzungsgetriebe, Wandler von Drehbewegung in Schubbewegung und andere, gegebenenfalls notwendige Elemente zur Bewegungsweiterleitung vom Motor bis zum angetriebenen Arbeitsorgan angetrieben wird. Anstelle einer solchen, rein linearen Bewegungsübertragung kann aber in bestimmten typischen Fällen durchaus auch eine nicht lineare Bewegungsübertragung sinnvoll sein und zu einer besonders günstigen Gesamtlösung führen, wie die Zwischenschaltung eines ungleichmäßig übersetzenden Getriebes, z.B. in Form einer einfachen Schubkurbel.

Das Wissen um diese Möglichkeiten soll Entwicklungsingenieure und -ingenieurinnen anregen, in entsprechenden Fällen derartige Kombinationslösungen zu berücksichtigen, mit denen manches eventuell einfacher oder eleganter gelöst werden kann als bei einem konsequenten Verzicht auf den

flywheel are completely sufficient.

Oftentimes, non-uniform translating mechanisms and servo drives are seen only as mutually exclusive competitors. Occasionally, however, a combination of an MCS with a non-uniform translating mechanism instead of a purely linear transmission of motion from the motor to the working element can represent a particularly favourable solution. Various ways of creating such a combined overall system are possible.

A typical initial situation is, for example, that in a machine an existing non-uniform translating mechanism is driven by a common main shaft of all sub-assemblies of the machine with more or less constant angular velocity. This mechanism – as it is – is to be retained, but is now to be given its own, individually controlled drive. The motive here is usually the gain in flexibility, e.g. for better adaptation of the motion sequence to the requirements of the technological process, for easier changeover to different production parameters, and/or in order to be able to react specifically to malfunctions or special operating conditions during operation.

For new developments, the process is generally reversed. First, a decision is made on the type of drive and, if necessary, it is decided that an MCS should be used, e.g., because of its flexibility. As a rule, it is then decided that the motor should either drive the working element directly or by using a reduction gearbox, linear transmission from rotary motion to linear motion and other elements that may be necessary for transmitting motion from the motor to the driven working element. Instead of such a purely linear transmission of motion, however, in certain typical cases a non-linear transmission of motion may well be useful and lead to a particularly favourable overall solution, such as the interconnection of a non-uniform translating mechanism, e.g., in the form of a simple slider crank.

The awareness of these possibilities should stimulate development engineers to consider such combination solutions in corresponding cases, and some cases can possibly be solved more simply or elegantly than with a strict renunciation of the use of non-uniform translating mechanisms in combi-

Einsatz von ungleichmäßig übersetzenden Getrieben in Kombination mit gesteuerten Antrieben. In jedem Fall muss natürlich entsprechender getriebe-technischer und maschinendynamischer Sachverstand verfügbar sein, siehe Schrifttum, und meist ist auch der Einsatz von speziellen Softwarewerkzeugen notwendig.

## 1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie soll überall dort Anregungen und Unterstützung geben, wo anspruchsvolle Bewegungsaufgaben gelöst werden müssen und dazu eventuell auch Kombinationen von Motion-Control-Systemen (MCS) mit ungleichmäßig übersetzenden Getrieben infrage kommen. Insbesondere betrifft dies die Entwicklung schnelllaufender Be- und Verarbeitungsmaschinen, daneben aber auch andere Bereiche des Maschinenbaus, wie Robotik, Handhabungstechnik, Fahrzeugtechnik oder Haushaltsgeräte.

Die Anwendung der Richtlinie kann sowohl bei Neuentwicklungen als auch bei der Weiterentwicklung und Effektivitätssteigerung vorhandener Lösungen Nutzen bringen.

Nach einer vergleichenden Betrachtung des prinzipiellen Aufbaus von elektromechanischen Antriebssträngen mit einem MCS zur Antriebssteuerung und mit oder ohne ein ungleichmäßig übersetzendes Getriebe in Abschnitt 3 werden als Schwerpunkt dieser Richtlinie in Abschnitt 4 prinzipielle Nutzeffekte vorgestellt, die durch die Kombination eines vorgesehenen MCS mit einem ungleichmäßig übersetzenden Getriebe mit nicht linearer Bewegungsübertragung erreichbar sind. Diese Aussage wird näher begründet, aufgegliedert und mit Beispielen belegt. Dabei werden hier nur Systeme mit dem Getriebelaufgrad  $F = 1$  betrachtet, also solche mit nur einem Antrieb.

Darüber hinaus werden ergänzend besondere Aspekte der Antriebsdimensionierung (Abschnitt 5) und der Antriebsregelung (Abschnitt 6) im Hinblick auf die Kombination von MCS mit ungleichmäßig übersetzenden Getrieben behandelt.

nation with controlled drives. In each case, of course, the appropriate expertise in mechanism technology and machine dynamics shall be available, see Bibliography, and in most cases the use of special software tools is also necessary.

## 1 Scope

This standard is intended to provide suggestions and support wherever demanding motion tasks have to be solved and combinations of motion control systems (MCS) with non-uniform translating mechanism may also be considered. This applies in particular to the development of high-speed machining and processing machines, but also to other areas of mechanical engineering such as robotics, handling technology, vehicle technology, or household appliances.

The application of the standard can bring benefits both for new developments and for the further development and increased effectiveness of existing solutions.

After a comparative consideration of the principle structure of electromechanical drive trains with an MCS for drive control and with or without a non-uniform translating mechanism in Section 3, Section 4 presents, as the focus of this standard, principle benefits that can be achieved by combining an intended MCS with a non-uniform translating mechanism with non-linear motion transmission. This statement is substantiated in more detail, broken down and supported with examples. Only systems with the degree of freedom  $F = 1$  are considered here, i.e., those with only one drive.

In addition, special aspects of drive dimensioning (Section 5) and drive control (Section 6) with regard to the combination of MCS with non-uniform translating mechanisms are dealt with.