



RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM
FAKULTÄT FÜR MASCHINENBAU
Institut für Konstruktionstechnik

Schriftenreihe

Heft 87.4

Thomas Siepmann

Reibmomente in Zylinderrollenlagern
für Planetenräder



**Lehrstuhl für
Maschinenelemente und
Getriebetechnik**

Thomas Siepmann

**Reibmomente in Zylinderrollenlagern
für Planetenräder**

Institut für Konstruktionstechnik
der Ruhr-Universität Bochum

Dissertation

Referent : o. Prof. Dr.-Ing. F. Jarchow

Korreferent : o. Prof. Dr.-Ing. E. O. Schneidersmann

Tag der Einreichung : 29.4.1987

Tag der mündlichen Prüfung : 05.6.1987

Institut für Konstruktionstechnik
der Ruhr-Universität Bochum

Alle Rechte vorbehalten

ISBN 3-89194-068-8

Satz: Plain T_EX

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebetechnik der Ruhr-Universität Bochum.

Meinem Lehrer, Herrn Prof. Dr.-Ing. F. Jarchow danke ich herzlich für seinen fachlichen Rat und die Förderung meiner Arbeit sowie das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. E. O. Schneidersmann danke ich für die Übernahme des Korreferates.

Bei den Mitarbeitern des Lehrstuhls möchte ich mich für die bereitwillige Unterstützung bei der Herstellung des Prüfstandes und der Dokumentation der Arbeit bedanken. Besonders bin ich meinen Kollegen Herrn Dipl.-Ing. W. Radisch und Herrn Dipl.-Ing. Th. Böhmer zu Dank verpflichtet, die als studentische Hilfskräfte wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit gibt ein Verfahren zur Bestimmung der Reibmomente von Zylinderrollenlagern für Planetenräder unter Berücksichtigung der relevanten Parameter an.

Durch die allgemeine Formulierung der Bewegungsgleichungen lassen sich beliebige Beschleunigungszustände dieses Lagertyps erfassen. Damit ist über die Anwendung auf Planetengetriebe hinaus, die Berechnung der Reibmomente von Zylinderrollenlagern, deren Mittelpunkte sich auf beliebigen Kurvenbahnen bewegen, möglich. Ein auf diesen Grundlagen aufbauendes, ausführlich dokumentiertes Rechenprogramm erlaubt die Simulation des dynamischen Verhaltens von Planetenradlagern mit zylindrischen Rollkörpern.

Zur Bestätigung der theoretisch gewonnenen Ergebnisse dienen Laufversuche auf einem Fliehkraft-Lagerprüfstand, der die Messung von Reibmoment und Schlupf bei zusätzlicher Beschleunigung der Prüflager gestattet.

Summary

This thesis describes a process for determining the friction moments of parallel roller bearings for planet gears making due allowance for all relevant parameters.

Thanks to the general formulation of the motion equations any acceleration state of this type of bearing can be covered. It is therefore not only applicable to the epicyclic gearing but can also be used to calculate the friction moments of parallel roller bearings whose centre points move along random curved paths. A highly documented computational program based on these fundamentals enables the dynamic behaviour of planet-gear bearings with parallel rollers to be simulated.

To confirm the theoretical findings, running tests were carried out on a centrifugal-force bearing test bed which permits measurement of friction moment and slip with the test bearings being subjected to additional acceleration.

Reibmomente in Planetenrad-Wälzlagern

Inhalt	Seite
1 Einführung	1
2 Aufgabenstellung	1
3 Lagerbauformen	6
3.1 Vollrollige Zylinderrollenlager	6
3.2 Zylinderrollenlager mit wälzkörpergeführtem Käfig	6
3.3 Zylinderrollenlager mit bordgeführtem Käfig	7
3.4 Nadellager	10
4 Koordinatensysteme	13
4.1 Ortsfestes Koordinatensystem	13
4.2 Geführtes Koordinatensystem	14
4.3 Lokale Koordinatensysteme	15
5 Lagerdynamik und Reibmoment	16
5.1 Dynamisches Modell	18
5.2 Bewegungsgleichungen	20
5.3 Lösung des Differentialgleichungssystems	32
6 Käfigverformungen	43
6.1 Verformungsmodell	45
6.2 Lösungsverfahren	45
6.2.1 Finite-Elemente-Methode	46
6.2.2 Kraftgrößenverfahren	57

7	Schmierspaltkräfte	64
7.1	Instationäre elastohydrodynamische Schmiertheorie	64
7.2	Näherungsgleichungen	65
7.3	Kenngrößen in den Schmierspalten	66
7.3.1	Wälzkörper - Innenring	67
7.3.2	Wälzkörper - Außenring	70
7.3.3	Wälzkörper - Käfig, gerade Taschenkontur	72
7.3.4	Wälzkörper - Käfig, kreisförmige Taschenkontur	75
7.3.5	Wälzkörper - Wälzkörper	81
7.3.6	Käfig - Führungsbord, außen	83
7.3.7	Käfig - Führungsbord, innen	85
8	Messungen	87
8.1	Meßmethode	87
8.2	Prüfstand	88
8.3	Versuchsprogramm	89
8.4	Versuchsergebnisse	95
8.4.1	Reibmomentmessung	95
8.4.2	Schlupf	120
9	EDV-Programmsystem RLSI	127
9.1	Lager-Simulationsprogramm SI	128
9.1.1	Programmablauf	128
9.1.2	Dateneingabe / Datenausgabe	131
9.1.3	Beispiele	138
9.2	Käfig-Verformungsprogramm KV	176
9.2.1	Programmablauf	176
9.2.2	Dateneingabe / Datenausgabe	176
9.2.3	Beispiel	178
9.3	Auswertungsprogramm AW	178
9.3.1	Programmablauf	178

10	Vergleich von theoretischen und experimentellen Ergebnissen	179
11	Zusammenfassung	184
12	Formelzeichen	185
13	Literatur	187
14	Anhang	190
14.1	Einflußzahlen für Käfigverformung	190
14.1.1	Käfig 2309 MPA	190
14.1.2	Käfig 2211 ECP	191
14.1.3	Käfig 2211 ECMA	192
14.1.4	Käfig NA4911	193
14.1.5	Käfig NKI 55/25	195
14.2	Listing des Lagersimulationsprogrammes SI	197

1 Einführung

Für die genaue Berechnung des Wirkungsgrades und der erforderlichen Kühllölströme in Planetengetrieben benötigt der Konstrukteur Angaben über die wirklichen Lagerverlustleistungen.

Die absolute Bewegung eines Planetenradlagers setzt sich aus einer Führungsbewegung infolge des drehenden Planetenradträgers und einer Relativbewegung durch die Eigendrehung des Lagers im Planetenradträger zusammen.

Im Vergleich zu Lagern, die in einem ortsfesten Gehäuse eingebaut sind, bewirken bei Planetenradlagern die Führungs- und Coriolisbeschleunigung zusätzliche Massenkräfte. Die Masse des Planetenrades mit zugehörigem Lagerring übt durch die Führungsbeschleunigung eine Kraft aus, die das Lager zusätzlich übertragen muß. Infolge der Führungs- und Coriolisbeschleunigung entstehen aber auch im Lager selbst durch die Massen der Wälzkörper und des Käfigs Zusatzkräfte. Dadurch tritt höhere Gleitreibung an den Führungsflächen von Wälzkörpern und Käfig auf.

Die vorliegende Arbeit gibt ein Rechenverfahren zur Bestimmung der Reibmomente in Planetenrad-Wälzlagern mit zylindrischen Rollkörpern unter Berücksichtigung der relevanten Parameter an. Die theoretisch gewonnenen Ergebnisse wurden an einem Fliehkraft-Lagerprüfstand kontrolliert.

2 Aufgabenstellung

Bei der Lagerung zweier zueinander bewegter Teile entsteht Reibung. Wegen der höheren erforderlichen Antriebsleistung und der Erwärmung der Lagerstelle strebt man die Verringerung der Reibungsverluste an. Dies gelingt bei Gleitlagern durch Zugabe von Schmiermitteln. Ersetzt man jedoch die Gleitbewegung durch ein Abrollen der Körper, so verringert sich durch die wesentlich günstigere Rollreibung die Verlustleistung des Lagers erheblich. Wegen der Robustheit, der einfachen Montage und Wartungsfreundlichkeit haben Wälzlager als genormtes Maschinenelement große Bedeutung erlangt. Wälzlager mit zylindrischen Rollkörpern zeichnen sich durch hohe Tragfähigkeit, Steifigkeit und geringe Reibung aus. Die wirtschaftliche Bedeutung dieser Lager zeigt sich an ihrem Anteil von ca. 30% des Wälzlager - Gesamtumsatzes in der Bundesrepublik Deutschland [1].

Die hohe Raumleistung sowie die Möglichkeit der Leistungsverzweigung und Überlagerung von Drehzahlen und Drehmomenten geben Umlaufgetrieben in vielen Fällen Überlegenheit gegenüber Standgetrieben. *Bild 1* zeigt

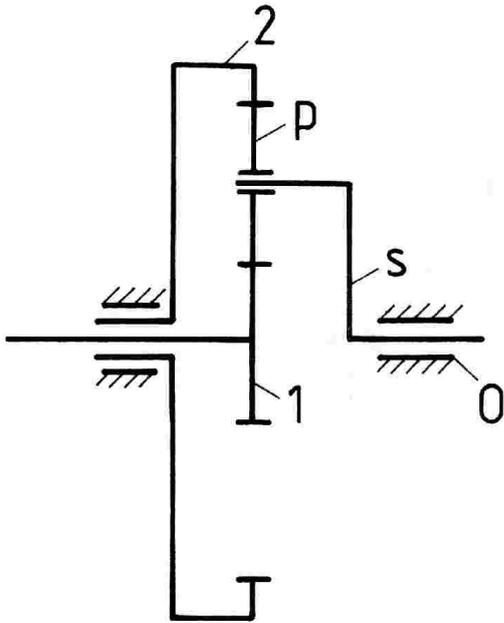


Bild 1: Dreiwelliges Umlaufgetriebe

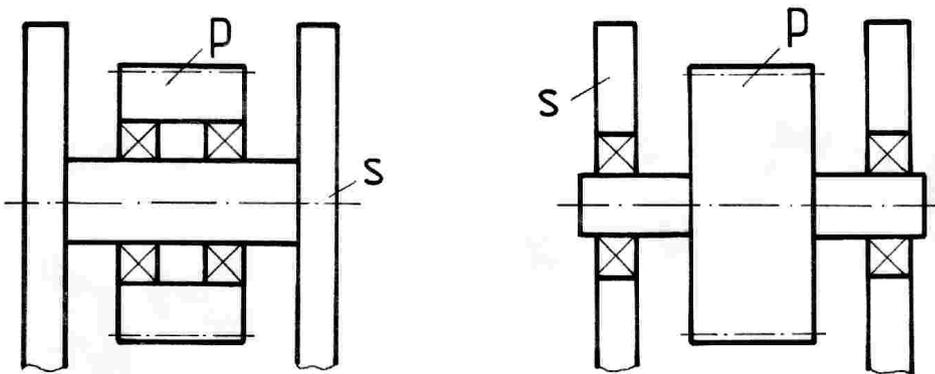


Bild 2: Planetenradlagerungen

schematisch ein dreiwelliges, rückkehrendes Umlaufgetriebe mit dem Sonnenrad 1, dem Hohlrads 2, dem Steg s und dem Planetenrad p. Dabei kann die Lagerung des Planetenrades nach Bild 2 auf einem stegfesten Bolzen oder über eine in den Stegwangen gelagerte Planetenradwelle erfolgen. Die beiden konstruktiven Ausführungen unterscheiden sich hinsichtlich der kinematischen Verhältnisse in den Lagern sowie in der Lage der Lastzone. Bei Verwendung eines stegfesten Bolzens laufen die Außenringe der Wälzlager mit dem Ringplaneten um, während in dem anderen Fall sich die Innen-

ringe mit der Planetenradwelle drehen. Die Lagerkraft setzt sich aus der resultierenden Verzahnungskraft und der Massenkraft des Planetenrades zusammen. Bei gleichem inneren und äußeren Betriebseingriffswinkel am Planetenrad wirkt die resultierende Verzahnungskraft in Stegumfangersrichtung. Die Massenkraft des Planetenrades verlagert die Lastzone bei umlaufendem Außenring zur stegzugewandten, bei umlaufendem Innenring zur stegabgewandten Seite des Lagers. Eine Umkehrung der Drehmomente im Getriebe und damit der resultierenden Verzahnungskraft läßt die Lastzone auf die entgegengesetzte Seite des Lagers wandern.

Die Richtungen der Stegdrehzahl n_{s0} und der stegbezogenen Lagerdrehzahl n_{ps} beeinflussen über die Coriolisbeschleunigung auf Wälzkörper und Käfig das Lagerverhalten.

Bild 3 zeigt, in Matrixform dargestellt, alle für ein Planetenradlager möglichen Kombinationen von Lastzone, Steg- und Planetenraddrehrichtung.

Die Spalten a und b enthalten Lager mit umlaufendem Außenring, während c und d die Varianten mit umlaufendem Innenring wiedergeben. Zu jedem Betriebszustand existiert ein gleichwertiger Fall, der durch kinematische Umkehr entsteht und symmetrisch zu dem Punkten uA oder uI angeordnet ist (z. B. b1-a4). Vergleichbare Betriebszustände der Varianten uA und uI liegen symmetrisch zum Matrix-Mittelpunkt. So ist bei der Variante a3 mit umlaufendem Außenring ein ähnliches Lagerverhalten zu erwarten wie bei d2 mit umlaufendem Innenring. In beiden Fällen sind die Drehrichtungen von Steg und Planetenrad entgegengesetzt und die Wälzkörper laufen von der dem Steg zugewandten Seite des Lagers in die Lastzone ein. Die acht unterschiedlichen, mit einem Quadrat gekennzeichneten Betriebszustände können am Prüfstand eingestellt werden. Es ist damit möglich, jeden vorkommenden Fall experimentell zu untersuchen.

Die innere Konstruktion von Planetenradlagern beeinflußt wesentlich ihr dynamisches Verhalten. Bei den für dieses Vorhaben untersuchten Zylinderrollenlagern wurde zwischen vollrolligen und käfiggeführten Lagern unterschieden, bei denen sich der Käfig entweder an den Wälzkörpern oder an einem der Lagerringe abstützt. Vollrollige Lager zeichnen sich durch eine hohe Tragfähigkeit aus, sind aber wegen der Gefahr des Fressens an den Wälzkörpern für hohe Stegdrehzahlen weniger geeignet [2]. Hier kommen Nadel- oder Zylinderrollenlager mit außenbordgeführten Käfigen zur Anwendung.

Es waren deshalb experimentelle und theoretische Untersuchungen durchzuführen, die den Einfluß von

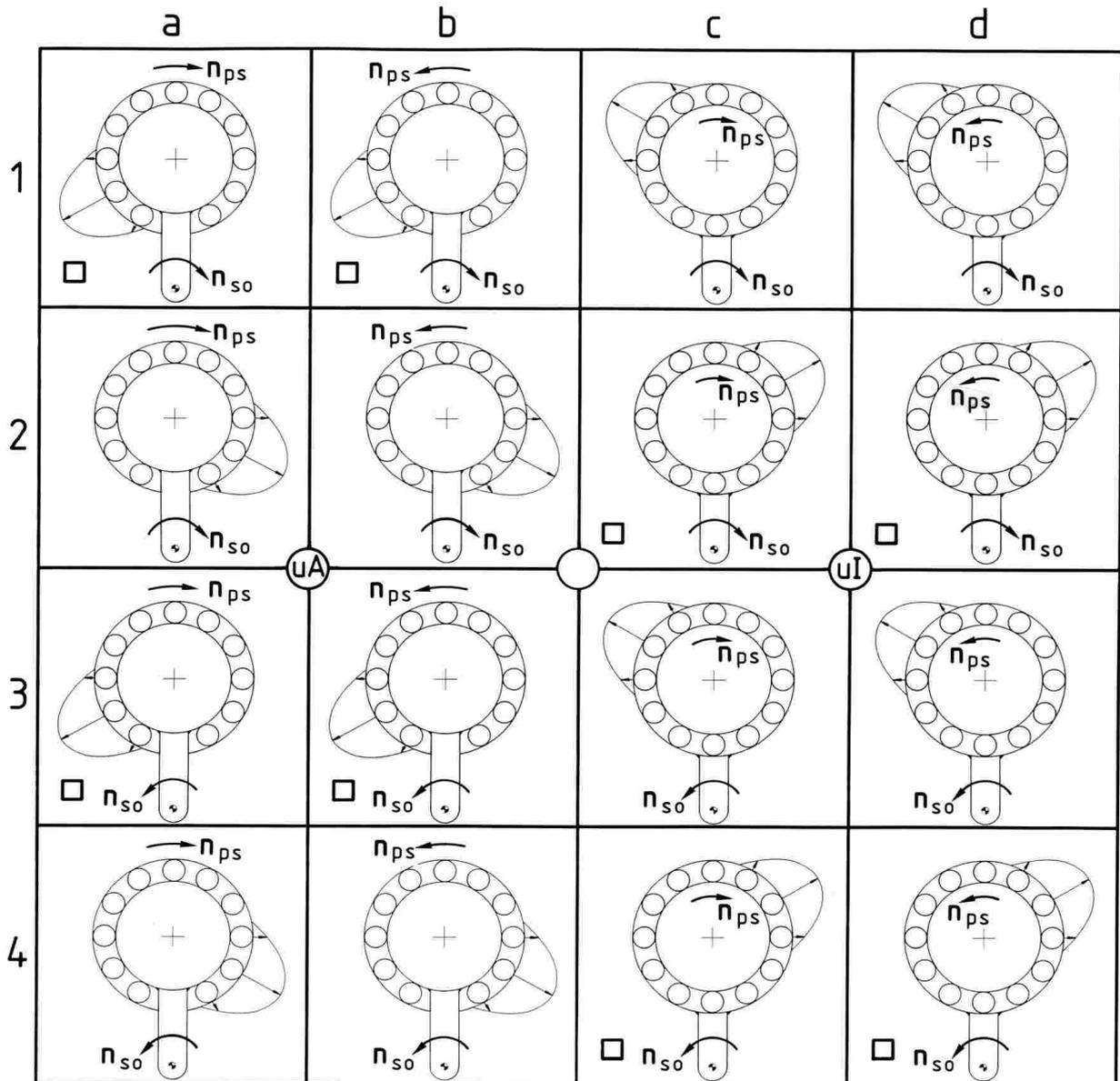


Bild 3: Betriebszustände von Planetenradlagern

n_{s0} Stegdrehzahl

n_{ps} stegbezogene Lagerdrehzahl

uA umlaufender Außenring

uI umlaufender Innenring

o im Prüfstand realisierbarer Betriebszustand

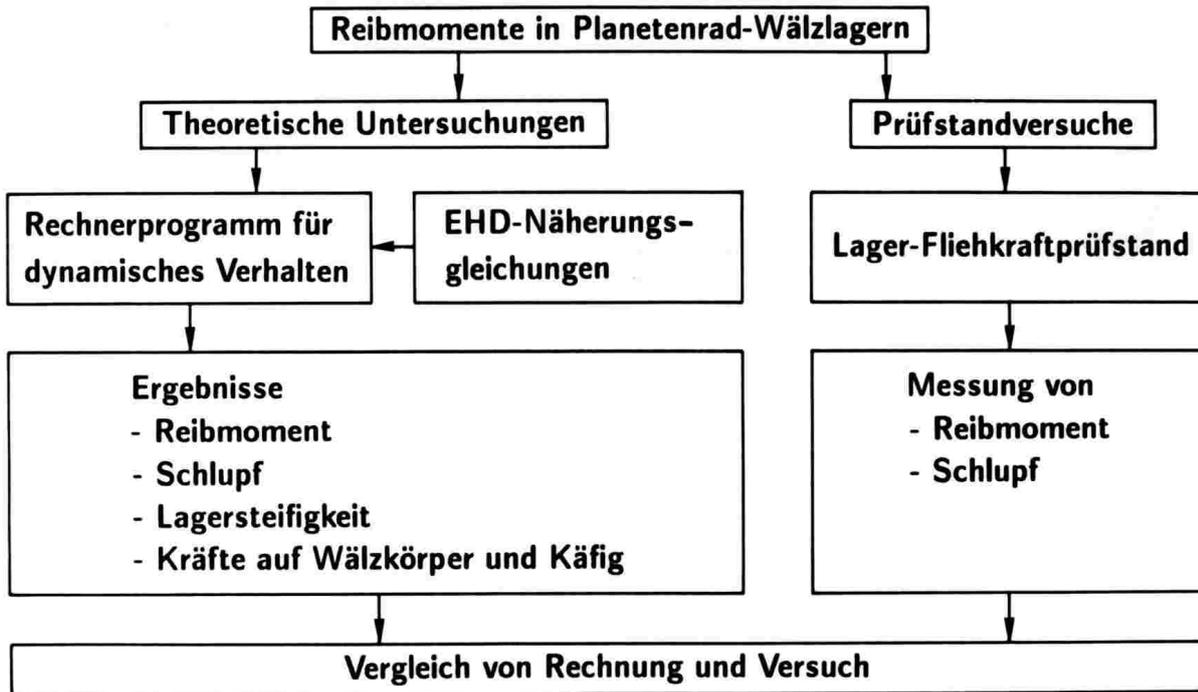


Bild 4: Lösungsweg

- innerer Konstruktion des Lagers
- Lagergröße
- Getriebekonstruktion
- Betriebszustand nach *Bild 3*

auf Reibmoment und Schlupf von Planetenrad-Wälzlagern mit zylindrischen Rollkörpern klären. *Bild 4* erläutert dazu die Vorgehensweise. Ein im Rahmen dieser Arbeit erstelltes Rechnerprogramm erfaßt, unter Verwendung der EHD¹⁾-Näherungsgleichungen aus [2], das dynamische Verhalten des Lagers und liefert als Ergebnisse unter anderem das Reibmoment und den Wälzkörper- bzw. Käfigschlupf für den betrachteten Betriebszustand. Zur Bestätigung der theoretisch gewonnenen Ergebnisse dienen Laufversuche auf einem Fliehkraft-Lagerprüfstand, der die Messung von Reibmoment und Schlupf der Prüflager gestattet.

¹⁾ Elastohydrodynamische Schmiertheorie

3 Lagerbauformen

Die in dieser Arbeit untersuchten Nadel- und Zylinderrollenlager unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Größe und inneren Konstruktion. Alle Lager haben die Bohrungszahl 11 (Bohrungsdurchmesser 55 mm) gemeinsam.

3.1 Vollrollige Zylinderrollenlager

Wegen der höheren Anzahl von Rollkörpern weisen vollrollige Zylinderrollenlager (*Bild 5*) eine höhere Tragfähigkeit auf als gleichgroße Ausführungen mit Käfig. Die direkte Berührung, verbunden mit hohen Gleitgeschwindigkeiten und zusätzlichen Massenkraften in Planetenradlagerungen, kann jedoch bei hohen Führungsbeschleunigungen zum Fressen der Rollkörper führen. *Bild 6* bringt die Abmessungen des Lagers SL18 2211¹⁾, das im Prüfstand zur Anwendung kam.

3.2 Zylinderrollenlager mit wälzkörpergeführtem Käfig

Für Zylinderrollenlager wird zunehmend der wälzkörpergeführte Massivkäfig aus Kunststoff eingesetzt. Als Käfigwerkstoff bevorzugt man hitzestabilisiertes, glasfaserverstärktes Polyamid. Obwohl die Führung dieses Käfigs durch die Wälzkörper wegen der hohen Stützkraften in Planetenradlagern nachteilig ist, lassen sich bei der betrachteten Lagergröße Stegdrehzahlen mit Führungsnormalbeschleunigungen von 125 mal Erdbeschleunigung erreichen [3]. Dies ist durch die geringe Käfigmasse und die Verformung des Käfigs, der dadurch mehr Wälzkörper an der Abstützung beteiligt, zu erklären. Die *Bilder 7* und *8* geben das in dieser Arbeit untersuchte Lager NJ2211 ECP²⁾ wieder.

1) Bezeichnung der Firma INA, Herzogenaurach

2) Bezeichnung der Firma SKF, Schweinfurt

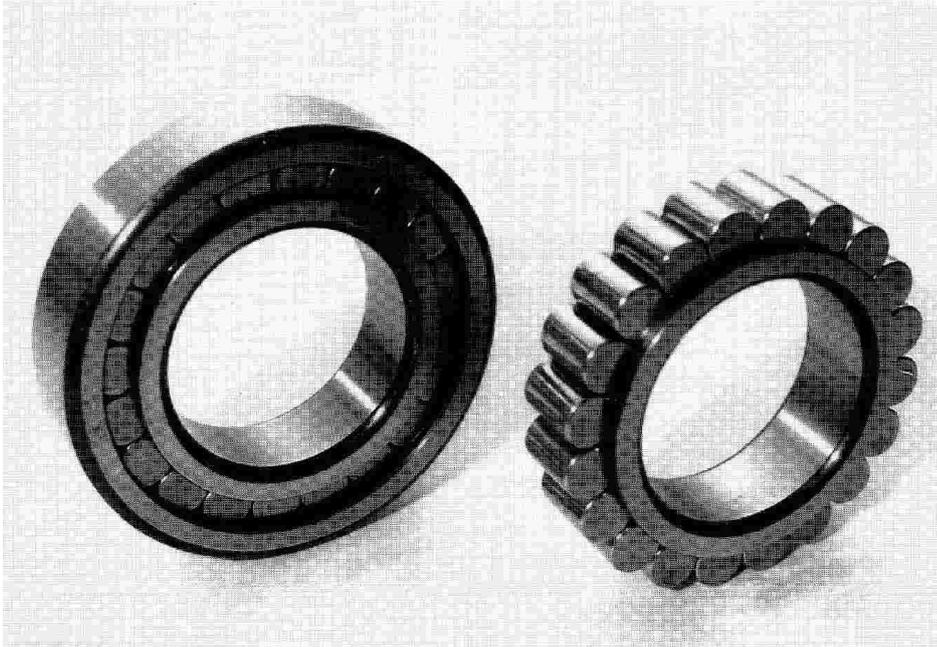


Bild 5: Vollrolliges Lager nach Bild 6

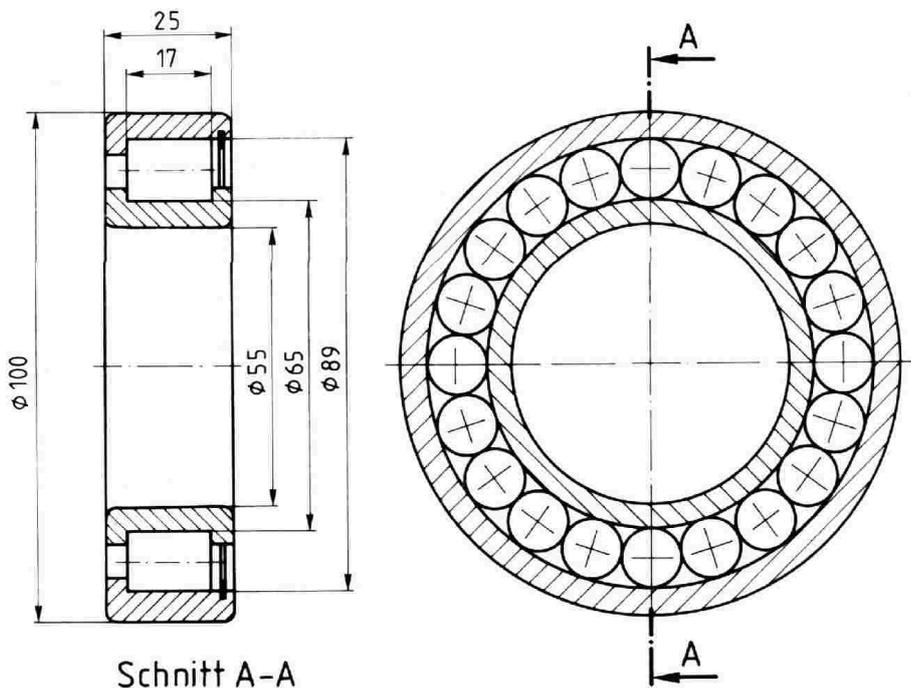


Bild 6: Zylinderrollenlager SL18 2211

3.3 Zylinderrollenlager mit bordgeführtem Käfig

Hohe Führungsbeschleunigungen erfordern bordgeführte Käfige, die sich an einem Lagerring abstützen (Bild 9). Zwischen den Gleitflächen von Käfig und Führungsbord entstehen dabei zusätzliche Reibungsverluste. Dafür treten aber geringere Kräfte zwischen den Käfigstegen und den Wälzkörpern auf als bei wälzkörpergeführten Käfigen. Bild 10 zeigt das für die

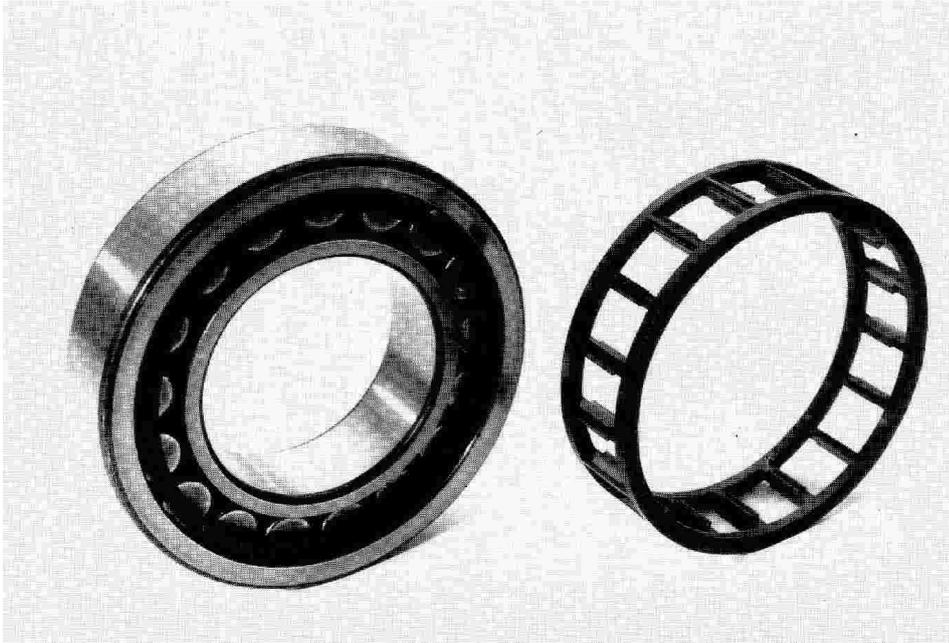


Bild 7: Zylinderrollenlager nach Bild 8 mit wälzkörpergeführtem Kunststoffkäfig

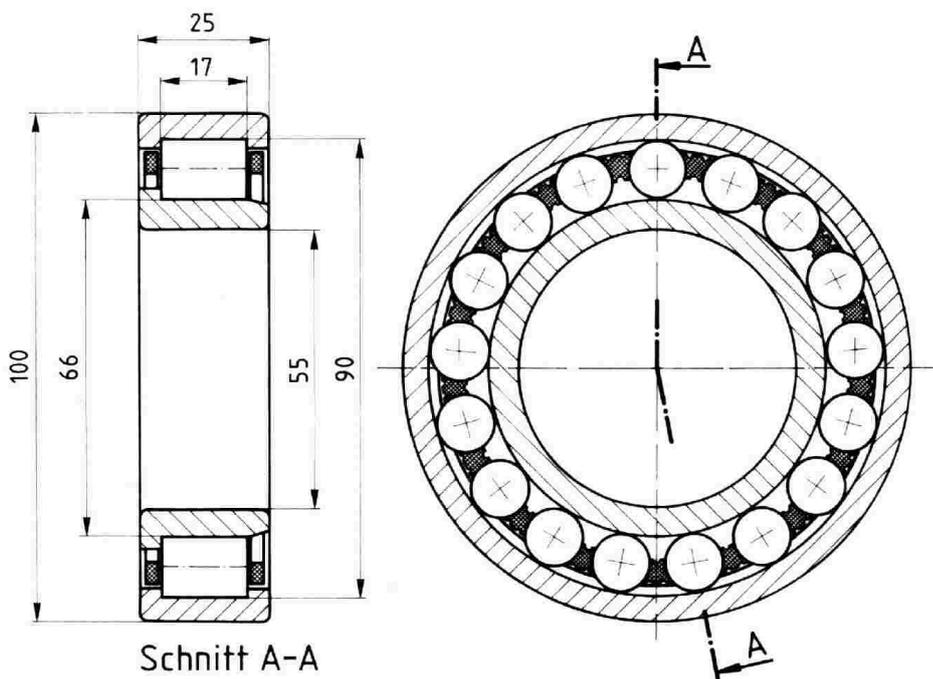


Bild 8: Zylinderrollenlager NJ2211 ECP

Messungen verwendete Lager des Typs NJ2211 ECMA¹⁾ mit außenbordgeführten Messingkäfig mit Zapfennieten und kreisförmiger Taschenkontur. Das Rechenverfahren erfaßt auch geräumte Messingmassivkäfige mit gerader Taschenkontur nach Bild 11. Der Vorteil dieser Bauart besteht we-

¹⁾ Bezeichnung der Firma SKF, Schweinfurt

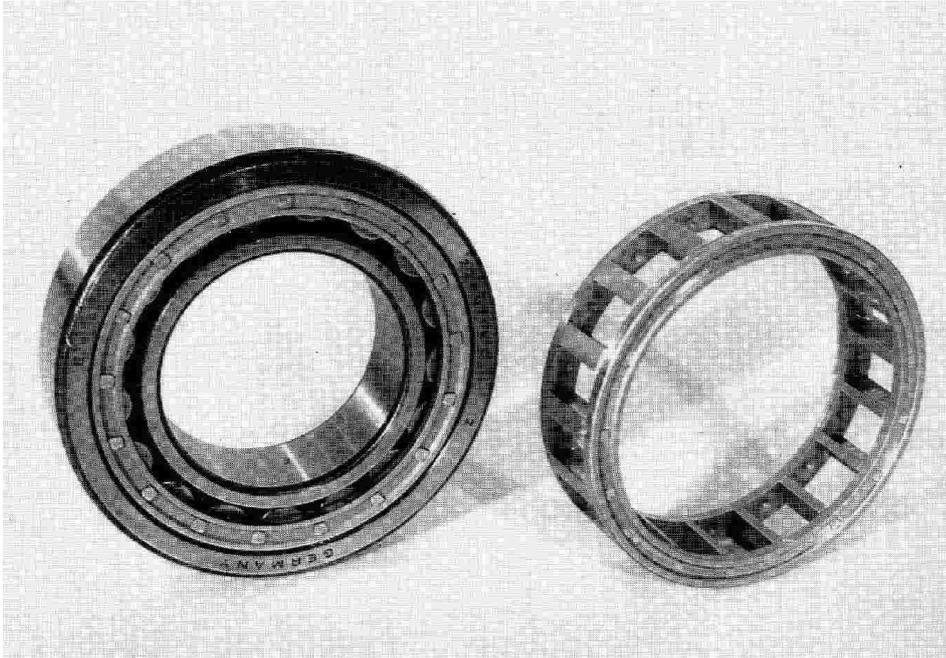


Bild 9: Zylinderrollenlager nach Bild 10 mit außenbordgeführtem Messingkäfig

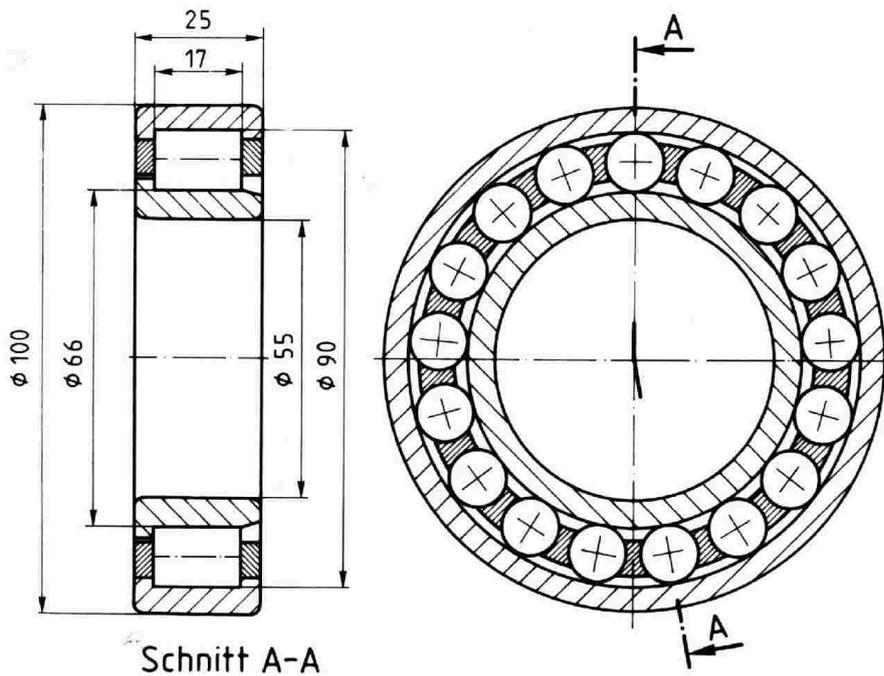


Bild 10: Zylinderrollenlager NJ2211 ECMA

gen der fehlenden Nietverbindungen in der geringen Empfindlichkeit gegen Käfigdauerbruch. Bild 12 gibt als Beispiel das Lager NJ2309 MPA²⁾ wieder.

²⁾ Bezeichnung der Firma FAG, Schweinfurt

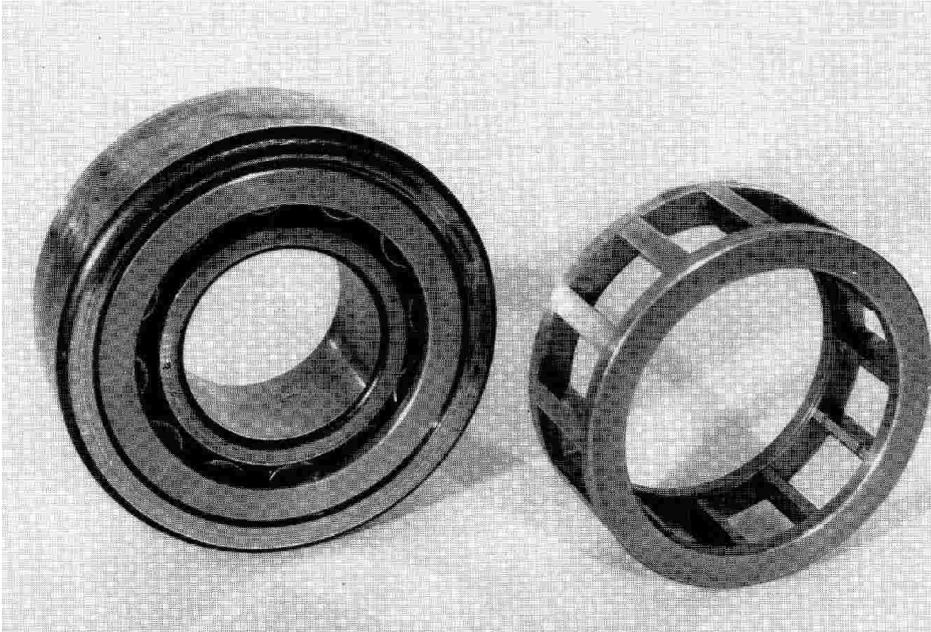


Bild 11: Zylinderrollenlager nach Bild 12 mit außenbordgeführtem Messingmassivkäfig

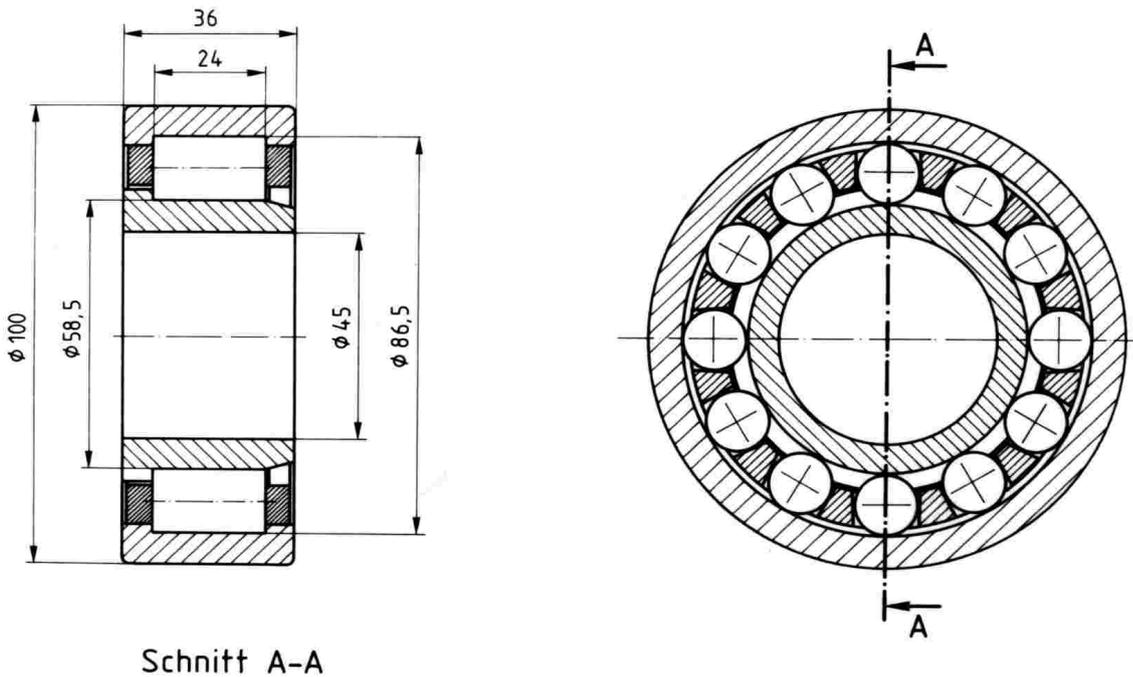


Bild 12: Zylinderrollenlager NJ2309 MPA

3.4 Nadellager

Nadellager eignen sich wegen der geringen Masse der Rollkörper und des Käfigs besonders für Planetenradlager bei hohen Führungsnormalsbeschleunigungen. Um den Einfluß der Baugröße auf das Reibmoment zu erfassen, werden bei gleichbleibender Bohrungskennzahl zwei Nadellager mit verschiedenem Außendurchmesser untersucht. Der bei diesen Ausführungen

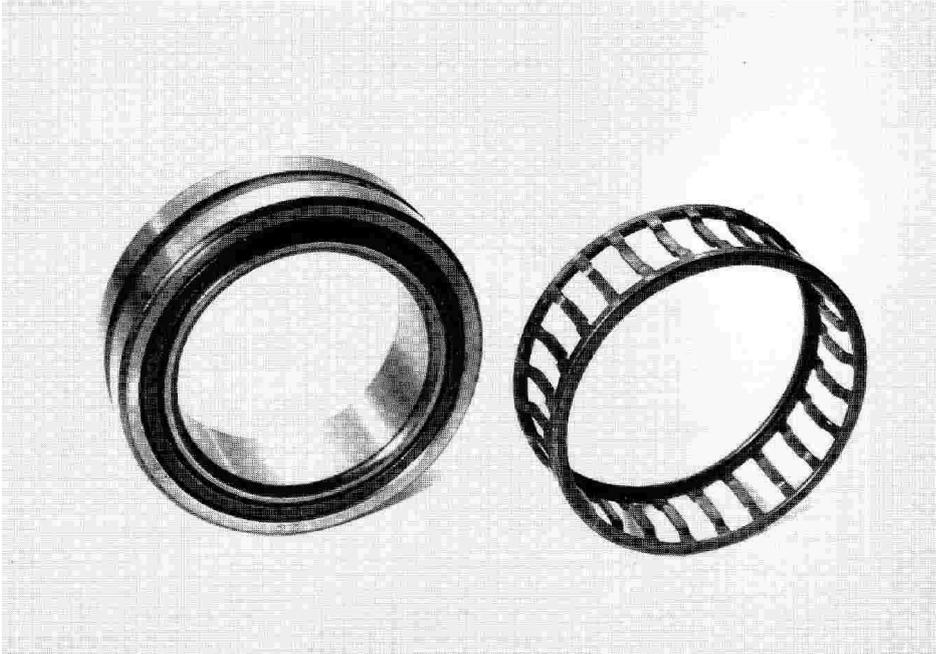


Bild 13: Nadellager NA4911 mit Stahlblechkäfig nach *Bild 15*

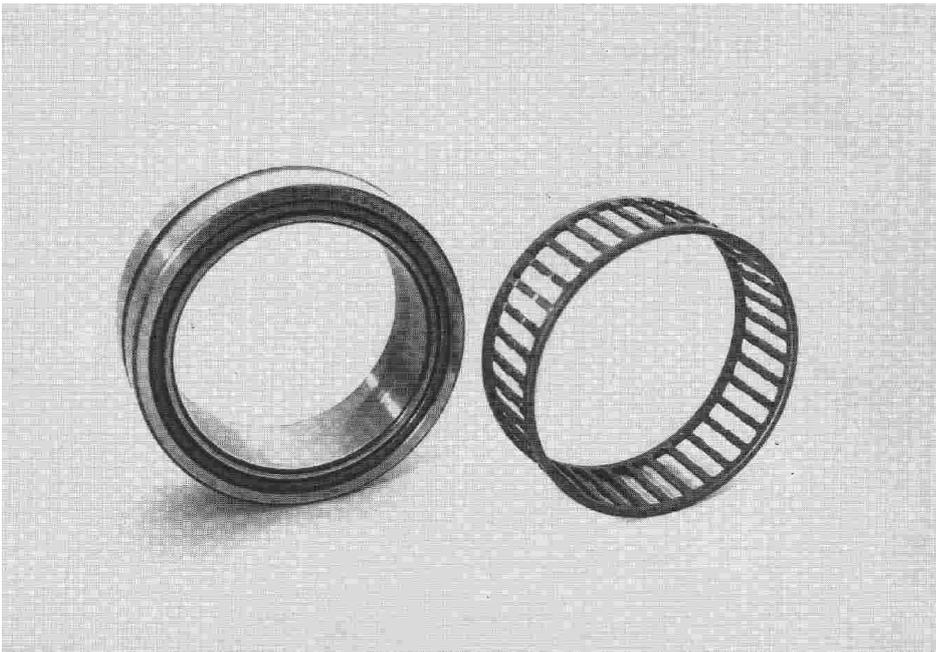


Bild 14: Nadellager NKI55/25 mit Stahlblechkäfig nach *Bild 16*

verwendete Stahlblechkäfig stützt sich im Betrieb an den Borden des Außenringes ab. Die *Bilder* 13 bis 16 ermöglichen den Vergleich mit den oben vorgestellten Lagerbauformen.

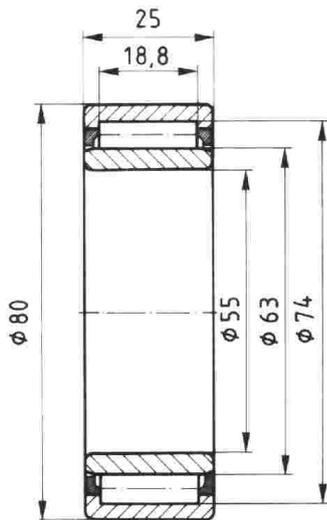


Bild 15: Nadellager NA4911

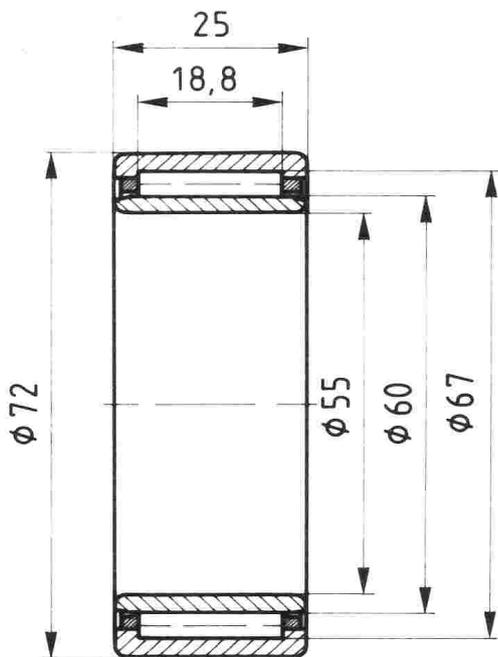


Bild 16: Nadellager NKI55/25

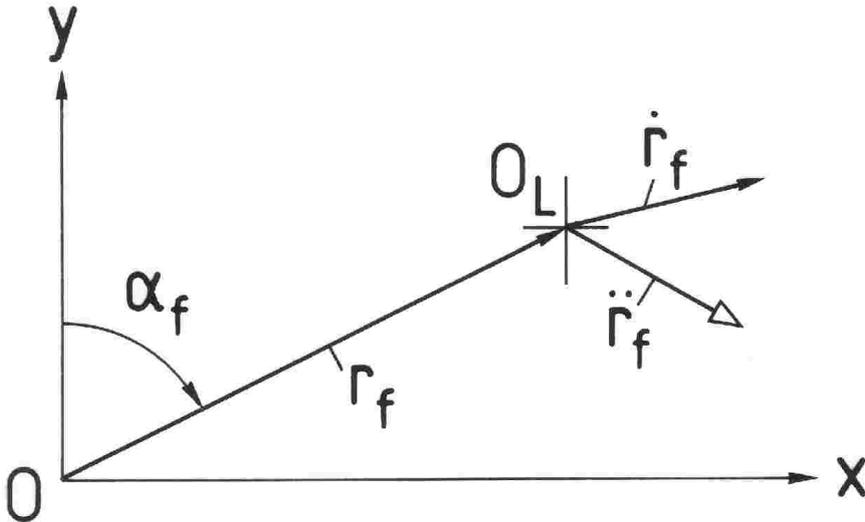


Bild 17: Ortsfestes Bezugssystem
 O_L Lagerschwerpunkt

4 Koordinatensysteme

Die Lage, Geschwindigkeit und Beschleunigung des Gesamtschwerpunktes und der einzelnen Lagerkomponenten sowie die in den Kontaktstellen zwischen Wälzkörpern, Käfig und Laufbahnen wirkenden Kräfte beschreiben das dynamische Verhalten von allgemein beschleunigten Wälzlagern.

Ein globales, cartesisches Orthogonalsystem definiert die Bewegung des Lagerschwerpunktes gegenüber dem Gehäuse. Ein Polarkoordinatensystem erfaßt die Lagerkinematik, während sich die Schmierspaltkräfte auf lokale, cartesische Koordinatensysteme, deren Ursprünge in den Kontaktstellen liegen, beziehen.

4.1 Ortsfestes Koordinatensystem

Das in *Bild 17* dargestellte, cartesische Orthogonalsystem mit dem Ursprung O und den Achsen x und y erfaßt die absolute Bewegung des Lagerschwerpunktes O_L . Der Ortsvektor \vec{r}_f

$$\vec{r}_f = r_f \begin{pmatrix} \sin \alpha_f \\ \cos \alpha_f \end{pmatrix} \quad (1)$$

legt mit der Länge r_f und dem Lagewinkel α_f den geometrischen Ort von O_L fest. Durch Differentiation von \vec{r}_f nach der Zeit erhält man die

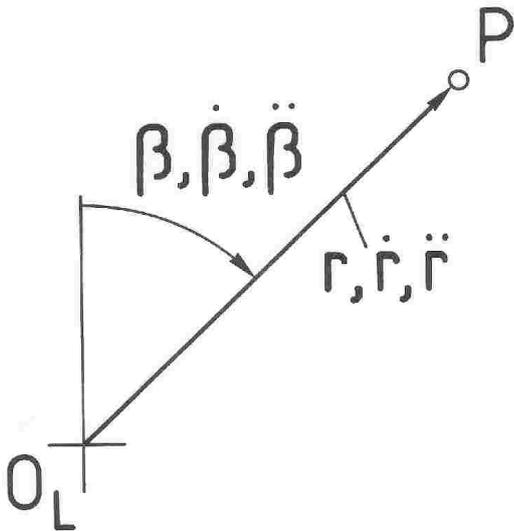


Bild 18: Polarkoordinatensystem im Lagerschwerpunkt

Geschwindigkeit des Punktes O_L

$$\dot{\vec{r}}_f = \begin{pmatrix} \dot{r}_f \sin \alpha_f + r_f \dot{\alpha}_f \cos \alpha_f \\ \dot{r}_f \cos \alpha_f - r_f \dot{\alpha}_f \sin \alpha_f \end{pmatrix} \quad (2)$$

und die Beschleunigung

$$\ddot{\vec{r}}_f = \begin{pmatrix} (\ddot{r}_f - \dot{\alpha}_f^2 r_f) \sin \alpha_f + 2(\dot{r}_f \dot{\alpha}_f + r_f \ddot{\alpha}_f) \cos \alpha_f \\ (\ddot{r}_f - \dot{\alpha}_f^2 r_f) \cos \alpha_f - 2(\dot{r}_f \dot{\alpha}_f + r_f \ddot{\alpha}_f) \sin \alpha_f \end{pmatrix} \quad (3)$$

gegenüber dem Gehäuse.

4.2 Geführtes Koordinatensystem

Zur Beschreibung der Lagerkinematik dient ein mit dem Punkt O_L verbundenes Polarkoordinatensystem nach *Bild 18*. Der Ortsvektor

$$\vec{r} = r \begin{pmatrix} \sin \beta \\ \cos \beta \end{pmatrix} \quad (4)$$

definiert die Lage des Punktes P, während die zeitlichen Ableitungen $\dot{\vec{r}}$ und $\ddot{\vec{r}}$ die Geschwindigkeit bzw. die Beschleunigung angeben.

Auf dieses Koordinatensystem beziehen sich die Drehzahlen der Lageringe, die Umlauf- und Radialgeschwindigkeiten sowie Beschleunigungen von Wälzkörpern und Käfig.

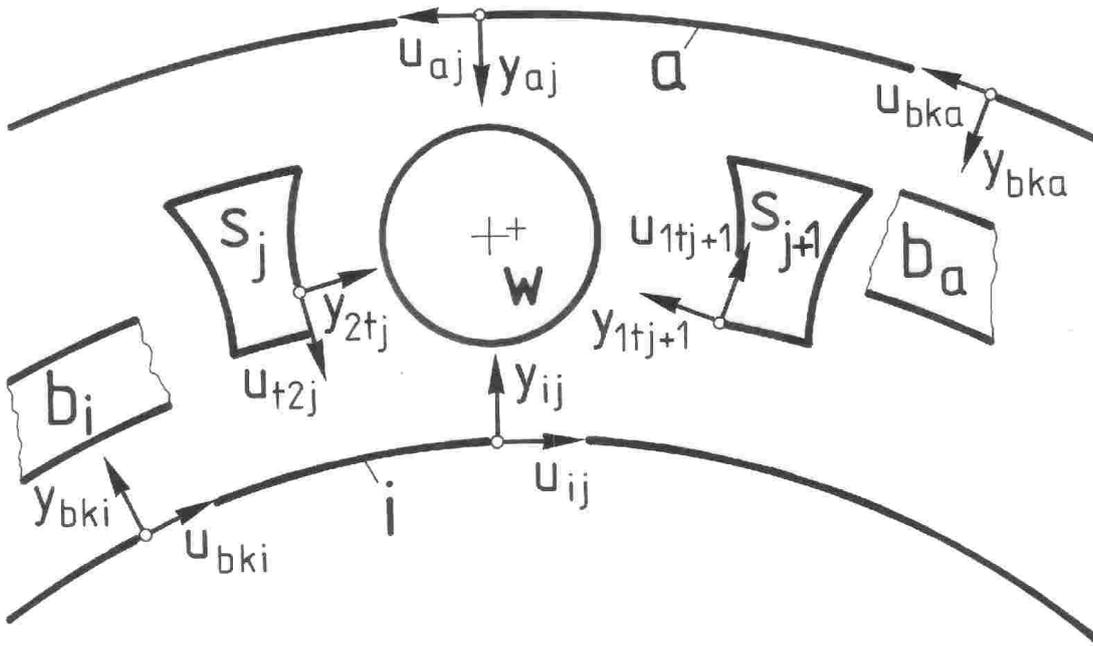


Bild 19: Lokale u, y -Koordinatensysteme
w Wälzkörper
a Außenring
i Innenring
s Käfigsteg
b Käfigbord

4.3 Lokale Koordinatensysteme

Die Kräfte zwischen den Lagerelementen Wälzkörper, Laufbahnen und Käfig hängen vom Schmierungszustand in den Kontaktstellen ab. Die minimale Spalthöhe und die Relativgeschwindigkeiten im Schmierpalt beziehen sich nach *Bild 19* auf die cartesischen u, y - Orthogonalsysteme, die ihrerseits einer allgemein beschleunigten Bewegung unterliegen. Die Koordinatenursprünge wandern mit den minimalen Schmierpalthöhen auf den Berührflächen, stellen also keine festen Punkte der betreffenden Lagerelemente dar.

5 Lagerkinematik und Reibmoment

Das Reibmoment eines Rollenlagers setzt sich im wesentlichen aus nachstehenden Anteilen zusammen :

- a) Rollreibung zwischen Wälzkörpern und Laufbahnen
- b) Gleitreibung zwischen
 - den Wälzkörpern in vollrolligen Lagern
 - den Wälzkörpern und den Laufbahnen außerhalb der Lastzone
 - den Wälzkörpern und den Käfigstegen
 - Käfig und Führungsborden
 - den Stirnseiten der Wälzkörper und den Führungsflächen an Lagerborden und Käfig
- c) Schmierstoffreibung

Im Gegensatz zu ortsfestem Betrieb trägt in allgemein beschleunigten Wälzlagern die Gleitreibung zwischen den Wälzkörpern und den Käfigstegen sowie in der Bordführung des Käfigs infolge der Führungsnormalbeschleunigung den größten Anteil zum Reibmoment bei. Die an den Wälzkörper-Stirnseiten entstehenden Verluste werden wegen der für Zylinderrollenlager geringen und bei Nadellagern überhaupt nicht zulässigen Axialkräfte vernachlässigt. Die vorliegende Arbeit berücksichtigt ebenfalls nicht die gegenüber Roll- und Gleitreibung geringe Schmierstoffreibung, da die für eine Berechnung erforderliche genaue Kenntnis des Schmierzustandes und der Temperaturverteilung der gesamten Lagerung mit den zugehörigen Anschlußteilen in der praktischen Anwendung nicht verfügbar ist.

Die konventionellen Ansätze [4] für das Reibmoment

$$M = \mu F \frac{d}{2} \quad (5)$$

und

$$M = M_0 + M_1 \quad (6)$$

$$M = f_0 (\nu n)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{d + D}{2} \right)^3 + \mu_1 f_1 F \frac{d + D}{2} \quad (7)$$

mit

- μ Reibungszahl
- F resultierende Lagerbelastung
- d Bohrungsdurchmesser
- D Lageraußendurchmesser
- f_0 Beiwert für Lagerbauart und Schmierung
- n Lagerdrehzahl
- ν dynamische Viskosität
- μ_1 Reibbeiwert für Lagerbauart und Belastung
- f_1 Beiwert für Lastrichtung

vernachlässigen aber den für Planetenrad-Lagerungen entscheidenden Einfluß der Führungs- sowie Coriolisbeschleunigung und die daraus resultierenden Massenkräfte der Lagerkomponenten. Das im folgenden vorgestellte Rechenverfahren erfaßt dagegen die oben genannten Roll- und Gleitreibungsanteile unter Berücksichtigung der bei allgemein beschleunigten Lagern auftretenden Eigendynamik. Das äußere, am Lager auftretende Reibmoment erhält man hier aus den in Umfangsrichtung auf den drehenden Lagerring wirkenden Kräfte von Wälzkörpern und Käfig.

$$M(t) = \sum_{j=1}^{n_w} [r F_{u1j}(t)] + r_b F_{u1b}(t) \quad (8)$$

Darin bedeuten

- n_w Anzahl der Wälzkörper
- r Laufbahnradius des drehenden Lageringes
- F_{u1j} von Wälzkörper j auf den drehenden Lagerring wirkende Umfangskraft
- r_b Führungsbordradius
- F_{u1b} vom Käfig auf die Führungsborde des drehenden Lageringes wirkende Umfangskraft

Die allgemein beschleunigte Bewegung der Wälzkörper und des Käfigs entsteht aus der Rotation des Planetenradträgers und der Relativbewegung des Lagers gegenüber dem Planetenradträger. Die Beschleunigung der Wälzkörper ruft an den Kontaktstellen mit Lagerringen und Käfig Kräfte hervor, die über das Schmiermittel übertragen werden. Die Berührung der Wälzkörper mit den Stegen erzeugt ein resultierendes Moment und eine resultierende Kraft auf den Käfig. Die Größe und Richtung dieser Kräfte erhält man für ein bestimmtes Lager mit bekanntem Schmierstoff durch Lösung der Reynoldsgleichung aus den Spalthöhen und den Relativgeschwindigkeiten der Schmierspaltgrenzen. Wälzkörper und Käfig legen durch ihren Bewegungszustand diese Spaltkenngößen fest.

Für die Berechnung des Lagerreibmomentes werden die Lagergeometrie sowie die Einflußgrößen des betreffenden Betriebszustandes vorgegeben; außerdem ist die äußere Kraft auf das Lager über die Exzentrizität des drehenden Lagerringes festzulegen. Lage, Geschwindigkeit und Beschleunigung der Wälzkörper und des Käfigs werden als Anfangswerte für die nachfolgende Runge-Kutta-Rechnung angesetzt. Die Runge-Kutta-Rechnung bestimmt nun nach kleinen, aufeinander folgenden Zeitintervallen Δt die neuen kinematischen Größen der Lagerkomponenten und der daraus resultierenden Kräfte, indem - von dem jeweils letzten Lagerzustand ausgehend - die zeitabhängigen Größen neu berechnet und für den nächsten Zeitschritt zur Verfügung gestellt werden. Hat sich das Lager auf den Betriebszustand eingestellt, wird die Rechnung beendet.

Außer dem Reibmoment liefert dieses Verfahren

- die Lagerkraft nach Größe und Richtung
- die Lagersteifigkeit
- den Schlupf zwischen Wälzkörpern und Lagerringen
- die Kräfte zwischen den Wälzkörpern
- die Kräfte der Wälzkörper und der Führungsborde auf den Käfig
- die Kräfte der Lagerringe auf die Wälzkörper

abhängig von der Zeit, bzw. von dem Lagerdrehwinkel. Der Einfluß von Axialkräften und Kippmomenten bleibt unberücksichtigt. Näherungsgleichungen nach [2], basierend auf der elasto-hydrodynamischen Schmiertheorie, liefern die Kräfte in den Schmierpalten zwischen Lagerringen, Wälzkörpern und Käfig.

5.1 Dynamisches Modell

Das der Rechnung zugrunde liegende, dynamische Modell nach *Bild 20* erfaßt den allgemeinen Geschwindigkeits- und Beschleunigungszustand der Führungsebene f (Planetenradträger), der Wälzkörper w und des Käfigs k . Die zum Lagermittelpunkt exzentrischen Lagerringe a und i laufen mit den Winkelgeschwindigkeiten $\dot{\beta}_i$ bzw. $\dot{\beta}_a$ um.

Der Lagewinkel α_f , die Winkelgeschwindigkeit $\dot{\alpha}_f$, die Winkelbeschleunigung $\ddot{\alpha}_f$ sowie der Radius r_f beschreiben den kinematischen Zustand der Führungsebene f . Die Größen \dot{r}_f und \ddot{r}_f sind für den Spezialfall eines Planetengetriebes gleich Null zu setzen.

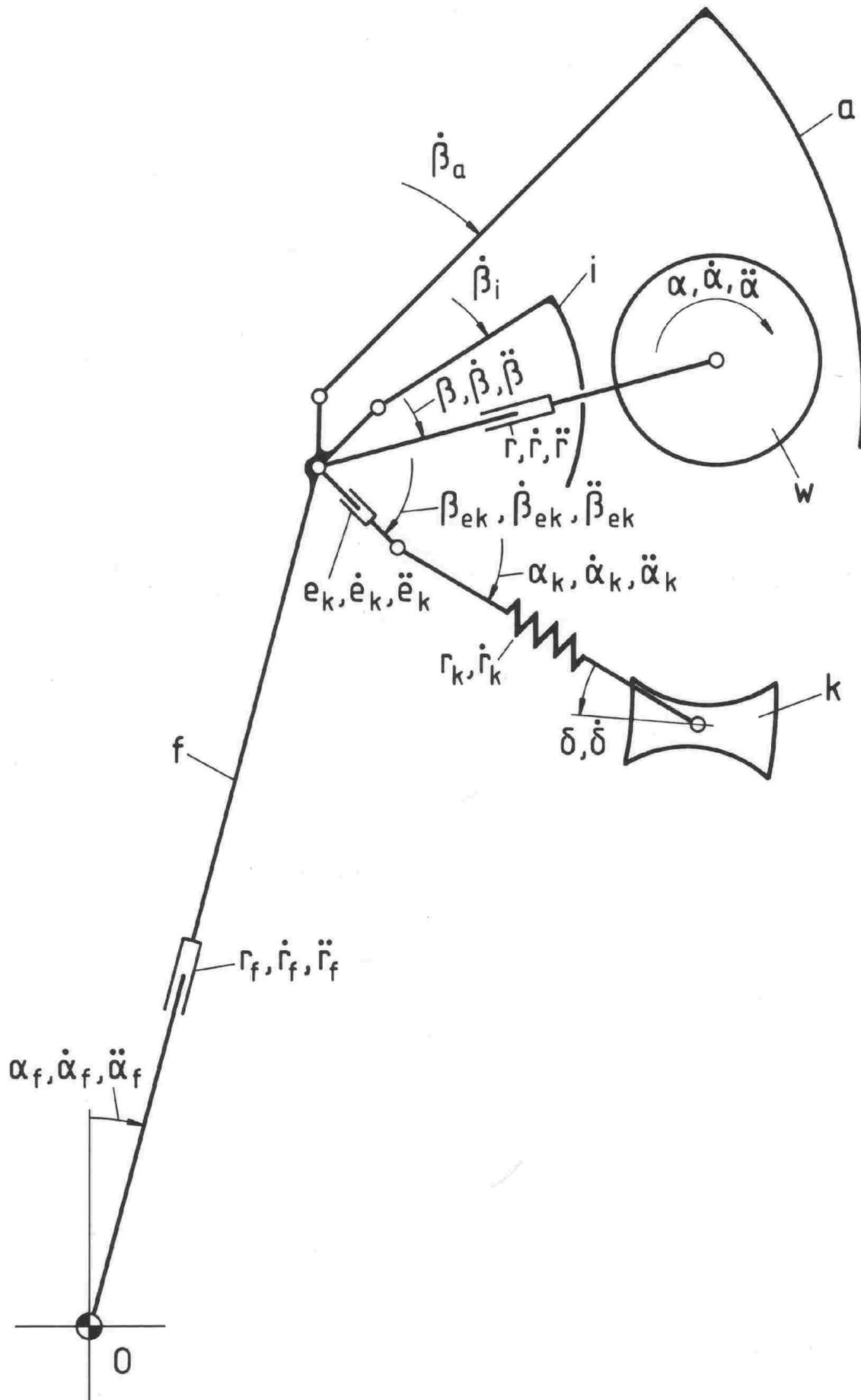


Bild 20: Dynamisches Modell

Der Wälzkörper w wird bezüglich der Führungsebene f vollständig beschrieben durch seinen geometrischen Ort (r, β) , die Umlaufwinkelgeschwindigkeit $\dot{\beta}$, die Radialgeschwindigkeit \dot{r} , deren zeitliche Ableitungen \ddot{r} und $\ddot{\beta}$ und durch seine Eigenrotation $(\alpha, \dot{\alpha}, \ddot{\alpha})$.

Analog dazu erfassen die Größen e_k, β_{ek} und ihre zeitlichen Ableitungen $\dot{e}_k, \dot{\beta}_{ek}, \ddot{e}_k, \ddot{\beta}_{ek}$ die Bewegung des Käfigschwerpunktes. Unter Berücksichtigung der Elastizität des Käfigs erhält man Verformungen in r_k - und α_k -Richtung sowie eine Verdrehung δ der Käfigstege. Infolge der Momente um den Käfigschwerpunkt verändern sich zusätzlich die Käfigwinkelgeschwindigkeit $\dot{\alpha}_k$ und -beschleunigung $\ddot{\alpha}_k$ zeitabhängig.

5.2 Bewegungsgleichungen

Die Lagerelemente unterliegen einer allgemein beschleunigten, ebenen Bewegung. Dabei erfahren die Wälzkörper einerseits Massenkräfte infolge der Normal -, Tangential -, Coriolis - und Führungsnormalbeschleunigungen, andererseits sind sie äußeren Kräften ausgesetzt, die von den Laufbahnen und Käfigstegen her angreifen. Die Massenkraft des Käfigs bestimmt sich aus den gleichen Beschleunigungen, die äußeren Kräfte jedoch kommen hier außer von den Wälzkörpern zusätzlich aus dem Kontakt zwischen Käfig und dem Bord des führenden Lagerringes.

Die in Abschnitt 4.2 vorgestellten Polarkoordinaten r, β beschreiben die Bewegung der Wälzkörper und des Käfigs, während das ortsfeste x, y -Koordinatensystem die allgemein beschleunigte Bewegung des Lagermittelpunktes erfaßt. Für einen Wälzkörper beschreiben der geometrische Ort seines Mittelpunktes, seine Geschwindigkeit und Beschleunigung sowie die Winkelgeschwindigkeit um die Rollen-Hauptachse eindeutig sein kinematisches Verhalten. Zur Festlegung der Käfigbewegung muß außer den für die Rollkörper genannten Größen zusätzlich die Winkelstellung α_k des Käfigs in der Simulationsrechnung mitgeführt werden, um die Lage der einzelnen Taschen am Umfang zu erfassen. Es sind also insgesamt siebzehn Bestimmungsgleichungen aufzustellen und zwar für folgende Größen

- Wälzkörper

r_j	Abstand zum Lagermittelpunkt
β_j	Lagewinkel
\dot{r}_j	Radialgeschwindigkeit
$\dot{\beta}_j$	Umlaufwinkelgeschwindigkeit
$\dot{\alpha}_j$	Eigenwinkelgeschwindigkeit
\ddot{r}_j	Radialbeschleunigung

$\ddot{\beta}_j$ Umlaufwinkelbeschleunigung
 $\ddot{\alpha}_j$ Eigenwinkelbeschleunigung

-Käfig

e_k Exzentrizität
 β_{ek} Lagewinkel der Exzentrizität
 α_k Drehwinkel
 \dot{e}_k Verlagerungs-Radialgeschwindigkeit
 $\dot{\beta}_{ek}$ Verlagerungs-Winkelgeschwindigkeit
 $\dot{\alpha}_k$ Eigenwinkelgeschwindigkeit
 \ddot{e}_k Verlagerungs-Radialbeschleunigung
 $\ddot{\beta}_{ek}$ Verlagerungs-Winkelbeschleunigung
 $\ddot{\alpha}_k$ Eigenwinkelbeschleunigung.

Aus den Beschleunigungen erhält man die übrigen Größen durch Integration über der Zeit. Es ist also zunächst die Beschleunigung des Wälzkörpermittelpunktes gegenüber dem ortsfesten Bezugssystem herzuleiten. Dabei erweist sich eine vektorielle Betrachtungsweise als günstig. Nach *Bild 21* legt der Vektor \vec{r}_{w0j} im ortsfesten und der Vektor \vec{r}_j im geführten Koordinatensystem die Lage eines Wälzkörpermittelpunktes in der Ebene fest. Der Lagermittelpunkt O_L sei definiert durch den Vektor \vec{r}_f . Dann folgt mit

$$\vec{r}_{w0j} = \vec{r}_f + \vec{r}_j \quad (9)$$

für die absolute Geschwindigkeit des Wälzkörpermittelpunktes über Differentiation nach der Zeit

$$\dot{\vec{r}}_{w0j} = \dot{\vec{r}}_f + \dot{\vec{r}}_j \quad (10)$$

und für die Beschleunigung

$$\ddot{\vec{r}}_{w0j} = \ddot{\vec{r}}_f + \ddot{\vec{r}}_j \quad (11)$$

Dabei gilt es zu beachten, daß $\ddot{\vec{r}}_j$ die Beschleunigung bezüglich des geführten Koordinatensystems bezeichnet, während die skalare Größe $\ddot{r}_{w0j,r}$ gleich der absoluten Beschleunigung \ddot{r}_{w0j} , projiziert in r-Richtung ist :

$$\ddot{r}_{w0,r} = \ddot{\vec{r}}_{w0j} \cdot \vec{e}_r \quad (12)$$

Die Projektion erfolgt dabei durch skalare Multiplikation von $\ddot{\vec{r}}_{w0j}$ mit dem Einheitsvektor in r-Richtung

$$\vec{e}_r = \begin{pmatrix} \sin(\alpha_f + \beta_j) \\ \cos(\alpha_f + \beta_j) \end{pmatrix} \quad (13)$$

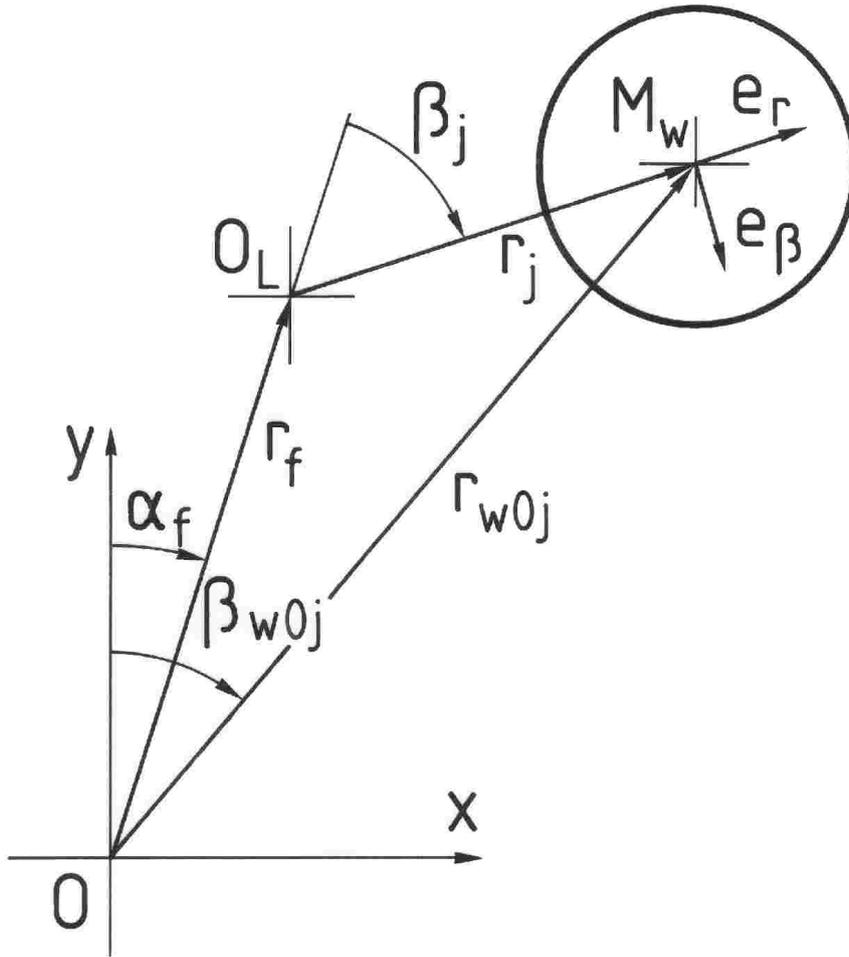


Bild 21: Lage des Wälzkörpermittelpunktes

Die in Gleichung (11) enthaltene Beschleunigung $\ddot{\vec{r}}_j$ erhält man durch zweimaliges Ableiten von \vec{r}_j nach der Zeit. Es gilt

$$\vec{r}_j = r_j \begin{pmatrix} \sin(\alpha_f + \beta_j) \\ \cos(\alpha_f + \beta_j) \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$\Rightarrow \dot{\vec{r}}_j = \begin{pmatrix} \dot{r}_j \sin(\alpha_f + \beta_j) + r_j (\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_j) \cos(\alpha_f + \beta_j) \\ \dot{r}_j \cos(\alpha_f + \beta_j) - r_j (\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_j) \sin(\alpha_f + \beta_j) \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \ddot{\vec{r}}_j = & \begin{pmatrix} \left[\ddot{r}_j - r_j (\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_j)^2 \right] \sin(\alpha_f + \beta_j) \\ \left[\ddot{r}_j - r_j (\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_j)^2 \right] \cos(\alpha_f + \beta_j) \end{pmatrix} \\ & + \begin{pmatrix} \left[+ 2\dot{r}_j (\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_j) + r_j (\ddot{\alpha}_f + \ddot{\beta}_j) \right] \cos(\alpha_f + \beta_j) \\ \left[- 2\dot{r}_j (\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_j) + r_j (\ddot{\alpha}_f + \ddot{\beta}_j) \right] \sin(\alpha_f + \beta_j) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

(16)

Die Beschleunigung $\ddot{\vec{r}}_f$ des Lagermittelpunktes läßt sich analog herleiten. Aus *Bild 21* entnimmt man

$$\vec{r}_f = r_f \begin{pmatrix} \sin \alpha_f \\ \cos \alpha_f \end{pmatrix} \quad (17)$$

und gewinnt durch zweifaches Differenzieren

$$\ddot{\vec{r}}_f = \begin{pmatrix} \left(\ddot{r}_f - \dot{\alpha}_f^2 r_f \right) \sin \alpha_f + (2\dot{r}_f \dot{\alpha}_f + r_f \ddot{\alpha}_f) \cos \alpha_f \\ \left(\ddot{r}_f - \dot{\alpha}_f^2 r_f \right) \cos \alpha_f - (2\dot{r}_f \dot{\alpha}_f + r_f \ddot{\alpha}_f) \sin \alpha_f \end{pmatrix} \quad (18)$$

Einsetzen der Gleichung (11) in (12) ergibt nach Ausführung des Skalarproduktes unter Berücksichtigung von (13)

$$\begin{aligned} \ddot{r}_{w0,r} = & \left[\left(\ddot{\vec{r}}_f \right)_x + \left(\ddot{\vec{r}}_j \right)_x \right] \sin(\alpha_f + \beta_j) \\ & + \left[\left(\ddot{\vec{r}}_f \right)_y + \left(\ddot{\vec{r}}_j \right)_y \right] \cos(\alpha_f + \beta_j) \end{aligned} \quad (19)$$

Darin bezeichnen die Indices x und y die entsprechende Komponente des betreffenden Vektors. Die Gleichungen (16) und (18) in (19) eingesetzt liefern

$$\begin{aligned}
 \ddot{r}_{w0,r} = & \left\{ (\ddot{r}_f - \dot{\alpha}_f^2 r_f) \sin \alpha_f + (2\dot{r}_f \dot{\alpha}_f + r_f \ddot{\alpha}_f) \cos \alpha_f \right. \\
 & + \left[\ddot{r}_f - r_j (\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_j)^2 \right] \sin(\alpha_f + \beta_j) \\
 & + \left. \left[2\dot{r}_j (\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_j) + r_j (\ddot{\alpha}_f + \ddot{\beta}_j) \right] \cos(\alpha_f + \beta_j) \right\} \sin(\alpha_f + \beta_j) \\
 & \left\{ (\ddot{r}_f - \dot{\alpha}_f^2 r_f) \cos \alpha_f + (2\dot{r}_f \dot{\alpha}_f + r_f \ddot{\alpha}_f) \sin \alpha_f \right. \\
 & + \left[\ddot{r}_f - r_j (\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_j)^2 \right] \cos(\alpha_f + \beta_j) \\
 & - \left. \left[2\dot{r}_j (\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_j) + r_j (\ddot{\alpha}_f + \ddot{\beta}_j) \right] \sin(\alpha_f + \beta_j) \right\} \cos(\alpha_f + \beta_j)
 \end{aligned} \tag{20}$$

Nach einigen Umformungen und unter Ausnutzung der Winkelbeziehung

$$\sin \alpha \sin(\alpha + \beta) + \cos \alpha \cos(\alpha + \beta) = \cos \beta \tag{21}$$

erhält man für die absolute Beschleunigung des Wälzkörpermittelpunktes in r-Richtung

$$\begin{aligned}
 \ddot{r}_{w0,r} = & (\ddot{r}_f - \dot{\alpha}_f^2 r_f) \cos \beta_j + (2\dot{r}_f \dot{\alpha}_f + r_f \ddot{\alpha}_f) \sin \beta_j \\
 & + \ddot{r}_j - r_j (\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_j)^2
 \end{aligned} \tag{22}$$

Die Beschleunigung des Wälzkörpers im ortsfesten Bezugssystem ist von der auf ihn wirkenden, resultierenden äußeren Kraft abhängig und es gilt für die Komponente in r-Richtung

$$\ddot{r}_{w0,r} = \frac{F_{res,r}}{m_w} \tag{23}$$

mit

$F_{res,r}$ resultierende, äußere Kraft auf den Wälzkörpermittelpunkt
in r-Richtung

m_w Masse des Wälzkörpers

Einsetzen von Gleichung (23) in (22) und Auflösen nach \ddot{r}_j liefert die erste gesuchte Bewegungsgleichung

$$\begin{aligned} \ddot{r}_j = & \dot{\alpha}_f^2 (r_f \cos \beta_j + r_j) + 2\dot{\alpha}_f \left(r_j \dot{\beta}_j - \dot{r}_f \sin \beta_j \right) \\ & - \ddot{\alpha}_f r_f \sin \beta_j + \dot{\beta}_j^2 r_j - \ddot{r}_f \cos \beta_j + \frac{F_{res,r}}{m_w} \end{aligned} \quad (24)$$

Analog zu Gleichung (12) gilt für die absolute Beschleunigung des Rollkörpers in β -Richtung

$$\ddot{r}_{w0,\beta} = \ddot{\vec{r}}_{w0j} \cdot \vec{e}_\beta \quad (25)$$

mit

$$\vec{e}_\beta = \begin{pmatrix} + \cos(\alpha_f + \beta_j) \\ - \sin(\alpha_f + \beta_j) \end{pmatrix} \quad (26)$$

und Einsetzen der Gleichungen (16) und (18) in (25) nach Ausführung des Skalarproduktes

$$\begin{aligned} \ddot{r}_{w0,\beta} = & \left\{ (\ddot{r}_f - \dot{\alpha}_f^2 r_f) \sin \alpha_f + (2\dot{r}_f \dot{\alpha}_f + r_f \ddot{\alpha}_f) \cos \alpha_f \right. \\ & + \left[\ddot{r}_f - r_j (\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_j)^2 \right] \sin(\alpha_f + \beta_j) \\ & + \left[2\dot{r}_j (\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_j) + r_j (\ddot{\alpha}_f + \ddot{\beta}_j) \right] \cos(\alpha_f + \beta_j) \left. \right\} \cos(\alpha_f + \beta_j) \\ & \left\{ (\ddot{r}_f - \dot{\alpha}_f^2 r_f) \cos \alpha_f + (2\dot{r}_f \dot{\alpha}_f + r_f \ddot{\alpha}_f) \sin \alpha_f \right. \\ & + \left[\ddot{r}_f - r_j (\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_j)^2 \right] \cos(\alpha_f + \beta_j) \\ & - \left[2\dot{r}_j (\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_j) + r_j (\ddot{\alpha}_f + \ddot{\beta}_j) \right] \sin(\alpha_f + \beta_j) \left. \right\} \sin(\alpha_f + \beta_j) \end{aligned} \quad (27)$$

Wie die radiale hängt auch die tangentielle Komponente der absoluten Beschleunigung nur von der resultierenden, äußeren Kraft auf den Wälzkörper ab und somit gilt

$$\ddot{r}_{w0,\beta} = \frac{F_{res,\beta}}{m_w} \quad (28)$$

$F_{res,\beta}$ Komponente der resultierenden äußeren Kraft auf den Wälzkörpermittelpunkt in β -Richtung

Mit Gleichung (28) in (27) eingesetzt und nach $\ddot{\beta}_j$ umgeformt erhält man unter Ausnutzung von (21) die Bewegungsgleichung

$$\begin{aligned} \ddot{\beta}_j = \frac{1}{r_j} \left[-\dot{\alpha}_f^2 r_f \sin \beta_j - 2\dot{\alpha}_f (\dot{r}_f \cos \beta_j + \dot{r}_j) \right. \\ \left. - \ddot{\alpha}_f (r_f \cos \beta_j + r_j) - 2\dot{r}_j \dot{\beta}_j + \ddot{r}_f \sin \beta_j + \frac{F_{res,\beta}}{m_w} \right] \end{aligned} \quad (29)$$

Die hergeleiteten Beschleunigungen \ddot{r}_j und $\ddot{\beta}_j$ gelten für ein allgemein beschleunigtes Lager, dessen Schwerpunktbewegung durch die Größen $r_f, \dot{r}_f, \ddot{r}_f$ und $\alpha_f, \dot{\alpha}_f, \ddot{\alpha}_f$ festgelegt ist. Durch Vorgabe der Funktionen $r_f(t), \alpha_f(t)$ und deren zeitliche Ableitungen läßt sich der Lagerschwerpunkt auf beliebigen Kurvenbahnen bewegen. Für ein Planetenradlager ist wegen des konstanten Achsabstandes

$$\dot{r}_f = 0 \quad (30)$$

$$\ddot{r}_f = 0 \quad (31)$$

Mit den Bezeichnungen

$r_{s0} = r_f$ Achsabstand

$\omega_{s0} = \dot{\alpha}_f$ Winkelgeschwindigkeit des Steges gegenüber dem Gehäuse 0

$\dot{\omega}_{s0} = \ddot{\alpha}_f$ Winkelbeschleunigung des Steges

vereinfachen sich die Gleichungen (24) und (29) zu

$$\begin{aligned} \ddot{r}_j = \omega_{s0}^2 (r_{s0} \cos \beta_j + r_j) + 2\omega_{s0} r_j \dot{\beta}_j \\ - \dot{\omega}_{s0} r_{s0} \sin \beta_j + \dot{\beta}_j^2 r_j + \frac{F_{res,r}}{m_w} \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\beta}_j = \frac{1}{r_j} \left[-\omega_{s0}^2 r_{s0} \sin \beta_j - 2\omega_{s0} \dot{r}_j - \dot{\omega}_{s0} (r_j + r_{s0} \cos \beta_j) \right. \\ \left. - 2\dot{r}_j \dot{\beta}_j + \frac{F_{res,\beta}}{m_w} \right] \end{aligned} \quad (33)$$

Die Winkelbeschleunigung um die Rollhauptachse $\ddot{\alpha}_j$ ergibt sich aus dem Massenträgheitsmoment des Wälzkörpers Θ_w und dem auf ihn wirkenden äußeren Moment M_{res} zu

$$\ddot{\alpha}_j = \frac{M_{res}}{\Theta_w} \quad (34)$$

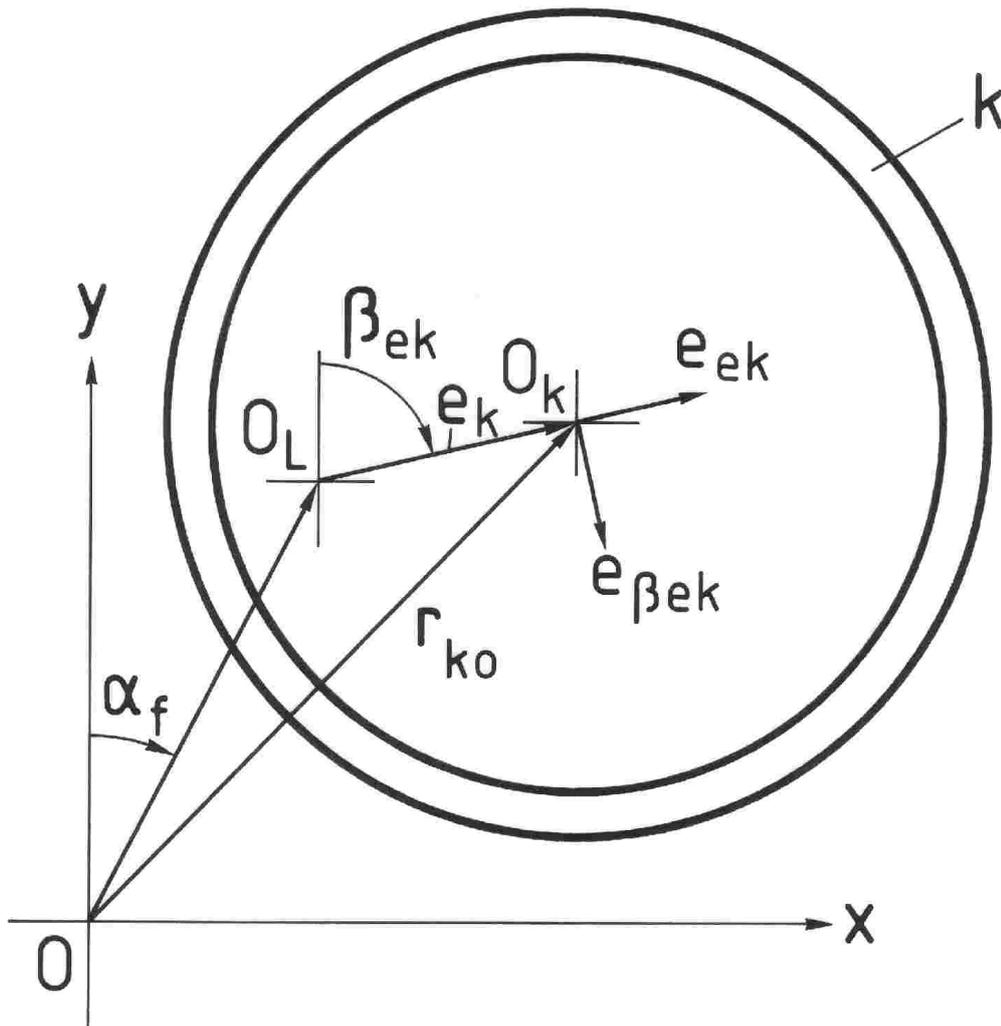


Bild 22: Lage des Käfigmittelpunktes

Die auf den Käfig wirkenden Beschleunigungen \ddot{e}_k , $\ddot{\beta}_{ek}$ und $\ddot{\alpha}_k$ lassen sich analog zu den entsprechenden Wälzkörpergrößen herleiten. Bild 22 zeigt den geometrischen Zusammenhang. Mit dem Ortsvektor \vec{e}_k des Käfigmittelpunktes

$$\vec{e}_k = e_k \begin{pmatrix} \sin \beta_{ek} \\ \cos \beta_{ek} \end{pmatrix} \quad (35)$$

wird

$$\begin{aligned} \ddot{\vec{e}}_k = & \begin{pmatrix} \left[\ddot{e}_k - e_k(\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_{ek})^2 \right] \sin(\alpha_f + \beta_{ek}) \\ \left[\ddot{e}_k - e_k(\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_{ek})^2 \right] \cos(\alpha_f + \beta_{ek}) \end{pmatrix} \\ & + \begin{pmatrix} \left[2\dot{e}_k(\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_{ek}) + e_k(\ddot{\alpha}_f + \ddot{\beta}_{ek}) \right] \cos(\alpha_f + \beta_{ek}) \\ - \left[2\dot{e}_k(\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_{ek}) + e_k(\ddot{\alpha}_f + \ddot{\beta}_{ek}) \right] \sin(\alpha_f + \beta_{ek}) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (36)$$

und es gelten die Vektorgleichungen

$$\vec{r}_{k0} = \vec{r}_f + \vec{e}_k \quad (37)$$

$$\ddot{\vec{r}}_{k0} = \ddot{\vec{r}}_f + \ddot{\vec{e}}_k \quad (38)$$

Die Zerlegung von $\ddot{\vec{r}}_{k0}$ in e_k - und β_{ek} -Richtung liefert die Skalarprodukte

$$\ddot{r}_{k0,ek} = \ddot{\vec{r}}_{k0} \cdot \vec{e}_{ek} \quad (39)$$

$$\ddot{r}_{k0,\beta_{ek}} = \ddot{\vec{r}}_{k0} \cdot \vec{e}_{\beta_{ek}} \quad (40)$$

mit den Einheitsvektoren

$$\vec{e}_{ek} = \begin{pmatrix} \sin(\alpha_f + \beta_{ek}) \\ \cos(\alpha_f + \beta_{ek}) \end{pmatrix} \quad (41)$$

$$\vec{e}_{\beta_{ek}} = \begin{pmatrix} +\cos(\alpha_f + \beta_{ek}) \\ -\sin(\alpha_f + \beta_{ek}) \end{pmatrix} \quad (42)$$

nach *Bild 22*. Setzt man $\ddot{\vec{r}}_f$ nach Gleichung (18) und $\ddot{\vec{e}}_k$ nach Gleichung (36) in (39) ein, so erhält man aus

$$\begin{aligned} \ddot{r}_{k0,ek} = & \left[\left(\ddot{\vec{r}}_f \right)_x + \left(\ddot{\vec{e}}_k \right)_x \right] \sin(\alpha_f + \beta_{ek}) \\ & + \left[\left(\ddot{\vec{r}}_f \right)_y + \left(\ddot{\vec{e}}_k \right)_y \right] \cos(\alpha_f + \beta_{ek}) \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \ddot{r}_{k0,ek} = & \left\{ (\ddot{r}_f - \dot{\alpha}_f^2 r_f) \sin \alpha_f + (2\dot{r}_f \dot{\alpha}_f + r_f \ddot{\alpha}_f) \cos \alpha_f \right. \\ & + \left[\ddot{r}_f - e_k(\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_{ek})^2 \right] \sin(\alpha_f + \beta_{ek}) \\ & \left. + \left[2\dot{e}_k (\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_{ek}) + e_k (\ddot{\alpha}_f + \ddot{\beta}_{ek}) \right] \cos(\alpha_f + \beta_{ek}) \right\} \sin(\alpha_f + \beta_{ek}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left\{ (\ddot{r}_f - \dot{\alpha}_f^2 r_f) \cos \alpha_f + (2\dot{r}_f \dot{\alpha}_f + r_f \ddot{\alpha}_f) \sin \alpha_f \right. \\
& + \left[\ddot{r}_f - e_k(\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_{ek})^2 \right] \cos(\alpha_f + \beta_{ek}) \\
& \left. - \left[2\dot{e}_k (\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_{ek}) + e_k (\ddot{\alpha}_f + \ddot{\beta}_{ek}) \right] \sin(\alpha_f + \beta_{ek}) \right\} \cos(\alpha_f + \beta_{ek})
\end{aligned} \tag{44}$$

Nach einigen Umformungen ergibt sich unter Berücksichtigung von Gleichung (21)

$$\begin{aligned}
\ddot{r}_{k0,ek} &= (\ddot{r}_f - \dot{\alpha}_f^2 r_f) \cos \beta_{ek} + (2\dot{r}_f \dot{\alpha}_f + r_f \ddot{\alpha}_f) \sin \beta_{ek} \\
& + \ddot{e}_k - e_k(\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_{ek})^2
\end{aligned} \tag{45}$$

$$\begin{aligned}
\ddot{r}_{k0,\beta_{ek}} &= \left[\left(\ddot{\vec{r}}_f \right)_x + \left(\ddot{\vec{e}}_k \right)_x \right] \cos(\alpha_f + \beta_{ek}) \\
& - \left[\left(\ddot{\vec{r}}_f \right)_y + \left(\ddot{\vec{e}}_k \right)_y \right] \sin(\alpha_f + \beta_{ek})
\end{aligned} \tag{46}$$

$$\begin{aligned}
\ddot{r}_{k0,\beta_{ek}} &= \left\{ (\ddot{r}_f - \dot{\alpha}_f^2 r_f) \sin \alpha_f + (2\dot{r}_f \dot{\alpha}_f + r_f \ddot{\alpha}_f) \cos \alpha_f \right. \\
& + \left[\ddot{r}_f - e_k(\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_{ek})^2 \right] \sin(\alpha_f + \beta_{ek}) \\
& \left. + \left[2\dot{e}_k(\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_{ek}) + e_k(\ddot{\alpha}_f + \ddot{\beta}_{ek}) \right] \cos(\alpha_f + \beta_{ek}) \right\} \cos(\alpha_f + \beta_{ek}) \\
& \left\{ (\ddot{r}_f - \dot{\alpha}_f^2 r_f) \cos \alpha_f + (2\dot{r}_f \dot{\alpha}_f + r_f \ddot{\alpha}_f) \sin \alpha_f \right. \\
& + \left[\ddot{r}_f - e_k(\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_{ek})^2 \right] \cos(\alpha_f + \beta_{ek}) \\
& \left. - \left[2\dot{e}_k(\dot{\alpha}_f + \dot{\beta}_{ek}) + e_k(\ddot{\alpha}_f + \ddot{\beta}_{ek}) \right] \sin(\alpha_f + \beta_{ek}) \right\} \sin(\alpha_f + \beta_{ek})
\end{aligned} \tag{47}$$

Die Beschleunigung $\ddot{\vec{r}}_{k0}$ im ortsfesten Bezugssystem hängt nur von der äußeren, auf den Käfigmittelpunkt wirkenden Kraft F_{resk} ab, so daß für die Komponenten in e_k - und β_{ek} -Richtung mit der Käfigmasse m_k gilt

$$\ddot{\vec{r}}_{k0,ek} = \frac{F_{resk,ek}}{m_k} \tag{48}$$

$$\ddot{r}_{k0,\beta ek} = \frac{F_{resk,\beta ek}}{m_k} \quad (49)$$

Die Gleichungen (48) und (49), eingesetzt in (45) bzw. (47), ergeben die Bewegungsgleichungen für die Verlagerungsradi- und -winkelgeschwindigkeit des Käfigs

$$\begin{aligned} \ddot{e}_k &= \dot{\alpha}_f^2 (r_f \cos \beta_{ek} + e_k) + 2\dot{\alpha}_f (e_k \dot{\beta}_{ek} - \dot{r}_f \sin \beta_{ek}) \\ &\quad - \ddot{\alpha}_f r_f \sin \beta_{ek} + \dot{\beta}_{ek}^2 e_k - \ddot{r}_f \cos \beta_{ek} + \frac{F_{resk,ek}}{m_k} \end{aligned} \quad (50)$$

und

$$\begin{aligned} \ddot{\beta}_{ek} &= \frac{1}{e_k} \left[-\dot{\alpha}_f^2 r_f \sin \beta_{ek} - 2\dot{\alpha}_f (\dot{r}_f \cos \beta_{ek} + \dot{e}_k) \right. \\ &\quad \left. - \ddot{\alpha}_f (r_f \cos \beta_{ek} + e_k) - 2\dot{e}_k \dot{\beta}_{ek} + \ddot{r}_f \sin \beta_{ek} + \frac{F_{res,\beta ek}}{m_k} \right] \end{aligned} \quad (51)$$

Für den Spezialfall eines Planetengetriebes vereinfachen sich auch hier mit den Gleichungen (30) und (31) die Beziehungen für \ddot{e}_k und $\ddot{\beta}_{ek}$

$$\begin{aligned} \ddot{e}_k &= \omega_{s0}^2 (r_{s0} \cos \beta_{ek} + e_k) + 2\omega_{s0} e_k \dot{\beta}_{ek} \\ &\quad - \dot{\omega}_{s0} r_{s0} \sin \beta_{ek} + \dot{\beta}_{ek}^2 e_k + \frac{F_{resk,ek}}{m_k} \end{aligned} \quad (52)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\beta}_{ek} &= \frac{1}{e_k} \left[-\omega_{s0}^2 r_{s0} \sin \beta_{ek} - 2\omega_{s0} \dot{e}_k - \dot{\omega}_{s0} (e_k + r_{s0} \cos \beta_{ek}) \right. \\ &\quad \left. - 2\dot{e}_k \dot{\beta}_{ek} + \frac{F_{resk,\beta ek}}{m_k} \right] \end{aligned} \quad (53)$$

Für $e_k = 0$ ist $\ddot{\beta}_{ek}$ in den Gleichungen (51) und (53) nicht definiert, da bei einer zentrischen Lage des Käfigs kein Verlagerungswinkel β_{ek} und keine Winkelbeschleunigung $\dot{\beta}_{ek}$ existieren.

Ein äußeres Moment M_{resk} um den Käfigmittelpunkt ruft eine Winkelbeschleunigung $\ddot{\alpha}_k$ in Abhängigkeit von dem Massenträgheitsmoment Θ_k des Käfigs hervor :

$$\ddot{\alpha}_k = \frac{M_{resk}}{\Theta_k} \quad (54)$$

Damit sind alle Beschleunigungen von Wälzkörpern und Käfig bezüglich des geführten r, β -Koordinatensystems bekannt. Bei einem Lager mit n_w Wälzkörpern erhält man das folgende System von $5n_w + 6$ voneinander abhängiger Integralgleichungen, worin der Index 0 den Anfangswert der jeweiligen Kinematikgröße zu dem Zeitpunkt $t = t_0$ bezeichnet:

$$\begin{aligned}
\dot{r}_j(t) = & \dot{r}_{j0} + \int_{t_0}^t \left\{ \dot{\alpha}_f(t)^2 [r_f(t) \cos \beta_j(t) + r_j(t)] \right. \\
& + 2\dot{\alpha}_f(t) [r_j(t) \dot{\beta}_j(t) - \dot{r}_f(t) \sin \beta_j(t)] \\
& - \ddot{\alpha}_f(t) r_f(t) \sin \beta_j(t) + \dot{\beta}_j(t)^2 r_j(t) - \ddot{r}_f(t) \cos \beta_j(t) \\
& \left. + \frac{F_{res,r}(t)}{m_w} \right\} dt
\end{aligned} \tag{55}$$

$$r_j(t) = r_{j0} + \int_{t_0}^t \dot{r}_j(t) dt \tag{56}$$

$$\begin{aligned}
\dot{\beta}_j(t) = & \dot{\beta}_{j0} + \int_{t_0}^t \frac{1}{r_j(t)} \left\{ -\dot{\alpha}_f(t)^2 r_f(t) \sin \beta_j(t) \right. \\
& - 2\dot{\alpha}_f(t) [\dot{r}_f(t) \cos \beta_j(t) + \dot{r}_j(t)] \\
& - \ddot{\alpha}_f(t) [r_f(t) \cos \beta_j(t) + r_j(t)] - 2 \dot{r}_j(t) \dot{\beta}_j(t) \\
& \left. + \ddot{r}_f(t) \sin \beta_j(t) + \frac{F_{res,\beta}(t)}{m_w} \right\} dt
\end{aligned} \tag{57}$$

$$\beta_j(t) = \beta_{j0} + \int_{t_0}^t \dot{\beta}_j(t) dt \tag{58}$$

$$\dot{\alpha}_j(t) = \dot{\alpha}_{j0} + \int_{t_0}^t \frac{M_{res w}(t)}{\Theta_w} dt \tag{59}$$

$$\begin{aligned}
\dot{e}_k = & \dot{e}_{k0} + \int_{t_0}^t \left\{ \dot{\alpha}_f(t)^2 [r_f(t) \cos \beta_{ek} + e_k] \right. \\
& + 2\dot{\alpha}_f(t) [r_j(t) \dot{\beta}_{ek} - \dot{r}_f(t) \sin \beta_{ek}] \\
& - \ddot{\alpha}_f(t) r_f(t) \sin \beta_{ek} + \dot{\beta}_{ek}^2 e_k - \ddot{r}_f(t) \cos \beta_{ek} \\
& \left. + \frac{F_{res,ek}(t)}{m_k} \right\} dt
\end{aligned} \tag{60}$$

$$e_k = e_{k0} + \int_{t_0}^t \dot{e}_k dt \tag{61}$$

$$\begin{aligned}
\dot{\beta}_{ek} = & \dot{\beta}_{ek0} + \int_{t_0}^t \frac{1}{e_k} \left\{ -\dot{\alpha}_f(t)^2 r_f(t) \sin \beta_{ek} \right. \\
& - 2\dot{\alpha}_f(t) [\dot{r}_f(t) \cos \beta_{ek} + \dot{e}_k] \\
& - \ddot{\alpha}_f(t) [r_f(t) \cos \beta_{ek} + e_k] - 2 \dot{e}_k \dot{\beta}_{ek} \\
& \left. + \ddot{r}_f(t) \sin \beta_{ek} + \frac{F_{res,\beta ek}(t)}{m_k} \right\} dt
\end{aligned} \tag{62}$$

$$\beta_{ek} = \beta_{ek0} + \int_{t_0}^t \dot{\beta}_{ek} dt \quad (63)$$

$$\dot{\alpha}_j(t) = \dot{\alpha}_{k0} + \int_{t_0}^t \frac{M_{res\ k}(t)}{\Theta_k} dt \quad (64)$$

$$\alpha_k(t) = \alpha_{k0} + \int_{t_0}^t \dot{\alpha}_k dt \quad (65)$$

5.3 Lösung des Differentialgleichungssystems

Die Lösung des inhomogenen, nichtlinearen Differentialgleichungssystems 2. Ordnung (55) bis (65) läßt sich nicht durch elementare Funktionen und Integrationen angeben. Man ist daher auf eine Näherungslösung mit Hilfe numerischer Verfahren angewiesen. Wegen der - bei genügend kleinen Schrittweiten - hohen Genauigkeit und der numerischen Stabilität kommt hier das Runge-Kutta Verfahren zur Anwendung. Eine nach jedem Rechenschritt durchgeführte Fehlerabschätzung und -korrektur sowie eine automatische Schrittweitenanpassung minimieren die Abweichung von der exakten Lösung.

Die in Abschnitt 5.2 vorgestellten Differentialgleichungen haben die Form

$$x(t) = x_0 + \int_{t_0}^t \dot{x}(t) dt \quad (66)$$

mit der Zeit t als unabhängiger Variablen und dem Anfangswert

$$x_0 = x(t_0) \quad (67)$$

Die Lösung $x(t)$ soll nun durch Näherungswerte x_i für die exakten Werte $x_i(t)$ ermittelt werden. *Bild 23* veranschaulicht die Vorgehensweise. Um, ausgehend von dem Zeitpunkt t_A mit

$$x_A = x(t_A) = x_1 \quad (68)$$

$$\dot{x}_1 = \dot{x}(t_A) \quad (69)$$

und der Schrittweite Δt nach t_E zu gelangen, sind vier Schritte durchzuführen. Zunächst bildet man mit der Ableitung $\dot{x}(t_A)$ die lineare

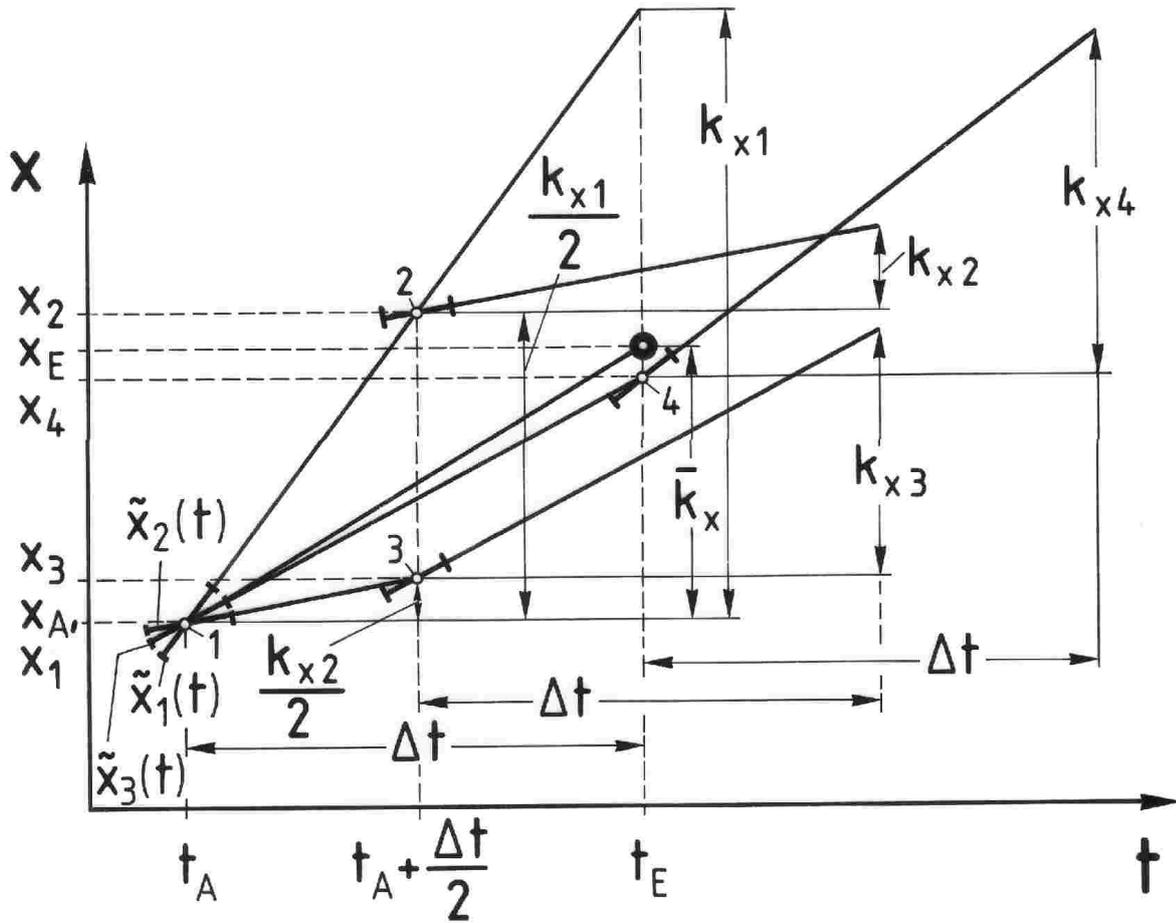


Bild 23: Runge-Kutta Näherungsverfahren

Funktion $\tilde{x}_1(t) = x_1 + \dot{x}_1(t - t_A)$ und erhält in einem zweiten Schritt für den Zeitpunkt

$$t = t_A + \frac{\Delta t}{2} \quad (70)$$

einen Wert

$$x_2 = x_A + \dot{x}_1 \frac{\Delta t}{2} \quad (71)$$

und den Zuwachs

$$k_{x1} = \dot{x}_1 \Delta t \quad (72)$$

Nun ermittelt man aus x_2 die zugehörige Ableitung

$$\dot{x}_2 = \dot{x}(t_A + \frac{\Delta t}{2}) \quad (73)$$

und damit

$$k_{x2} = \dot{x}_2 \Delta t \quad (74)$$

Ausgehend von t_A liefert dann die über das Intervall Δt konstant gehaltene Steigung \dot{x}_2 einen weiteren Wert

$$x_3 = x_A + \dot{x}_2 \frac{\Delta t}{2} \quad (75)$$

dessen zeitliche Ableitung \dot{x}_3 sich von dem vorigen Wert unterscheidet. Mit der konstanten Funktion \dot{x}_3 lassen sich schließlich für t_E die Werte

$$x_4 = x_A + \dot{x}_3 \Delta t \quad (76)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{dx_4}{dt} \quad (77)$$

und

$$k_{x4} = \dot{x}_4 \Delta t \quad (78)$$

bestimmen. Der Wert x_4 stellt jedoch noch nicht die endgültige Näherungslösung für $x(t_E)$ dar. Man bildet vielmehr das gewogene Mittel des Zuwachses in dem Zeitintervall Δt

$$\bar{k}_x = \frac{1}{6} (k_{x1} + 2k_{x2} + 2k_{x3} + k_{x4}) \quad (79)$$

und erhält mit

$$x_E = x_A + \bar{k}_x \quad (80)$$

das bis zur 4. Potenz von Δt mit der Taylorreihenentwicklung des exakten Wertes $x(t_E)$ übereinstimmende Näherungsergebnis.

Zur Abschätzung des verfahrensbedingten Fehlers geht man jeweils nach zwei berechneten Zeitintervallen an den Ausgangspunkt zurück und wiederholt die Rechnung mit der doppelten Schrittweite $2\Delta t$. Dann beträgt der Fehler der ersten Rechnung ungefähr $\frac{1}{15}$ der Differenz beider Ergebnisse (s. Wenzel [5])

$$\Delta x = \frac{1}{15} (x_{\Delta t} - x_{2\Delta t}) \quad (81)$$

Führt man diese Fehlerrechnung fortlaufend durch, so kann man die Werte von Δx zur Steuerung der Schrittweite Δt heranziehen, da der Fehler aufgrund des bis zur 4. Potenz von Δt durchgeführten Taylorabgleichs der k_x -Werte mit Δt^5 wächst. Zur Beurteilung von Δx dienen zwei Fehlergrenzen ϵ_{min} und ϵ_{max} . Dabei bewirkt das Unterschreiten der vorgegebenen Grenze ϵ_{min} eine Vergrößerung von Δt , während bei Überschreitung der zweiten Grenze ϵ_{max} die Schrittweite zu verkleinern ist. In diesem Fall müssen mit dem neuen, verringerten Δt die beiden letzten Rechenschritte wiederholt werden, da sich der unzulässig große Fehler zu dem aktuellen Zeitpunkt sonst weiter fortpflanzt. Abweichungen Δx , deren Betrag zwischen ϵ_{min} und ϵ_{max} liegt, lassen die Schrittweite unverändert. Für jede, mit den Gleichungen (55) bis (65) zu berechnende Größe sind dem Betriebszustand des Lagers angepaßte, eigene Fehlergrenzen vorzugeben. Auf diese Weise erreicht man eine Minimierung des Rechenaufwandes und die gewünschte Genauigkeit der Lösung.

Vor Beginn der Rechnung sind für alle Kinematikgrößen die Anfangswerte x_0 (s. Gleichung (66)) vorzugeben. Dabei wählt man sinnvollerweise dem Betriebszustand des Lagers möglichst gut angepaßte Startwerte, um den rechentechnisch bedingten Einschwingvorgang zu verkürzen. Im folgenden werden deshalb diese Werte für den allgemeinen Fall hergeleitet.

Die Verlagerungen \vec{e}_i und \vec{e}_a der Laufbahnen legen nach *Bild 24* die Exzentrizität \vec{e}_{k0} des Käfigs für den Zeitpunkt $t = t_0$ fest

$$\vec{e}_{k0} = e_{k0} \begin{pmatrix} \sin \beta_{ek0} \\ \cos \beta_{ek0} \end{pmatrix} = \vec{e}_i + \frac{1}{2} \overrightarrow{O_I O_A} \quad (82)$$

während die Verlagerungsgeschwindigkeit und der Drehwinkel α_{k0} gleich Null zu setzen sind :

$$\dot{e}_{k0} = 0 \quad (83)$$

$$\dot{\beta}_{ek0} = 0 \quad (84)$$

$$\alpha_{k0} = 0 \quad (85)$$

Die Winkelgeschwindigkeit α_{k0} des Käfigs nimmt man mit 90% des theoretischen Wertes bei schlupffreiem Betrieb des Lagers an, um - besonders bei geringen Führungsbeschleunigungen - nach wenigen Rechenschritten eine Berührung zwischen Wälzkörpern und Käfig herzustellen und damit den Einschwingvorgang zu verkürzen :

$$\dot{\alpha}_{k0} = 0,9 \frac{r_a \dot{\beta}_a + r_i \dot{\beta}_i}{r_a + r_i} \quad (86)$$

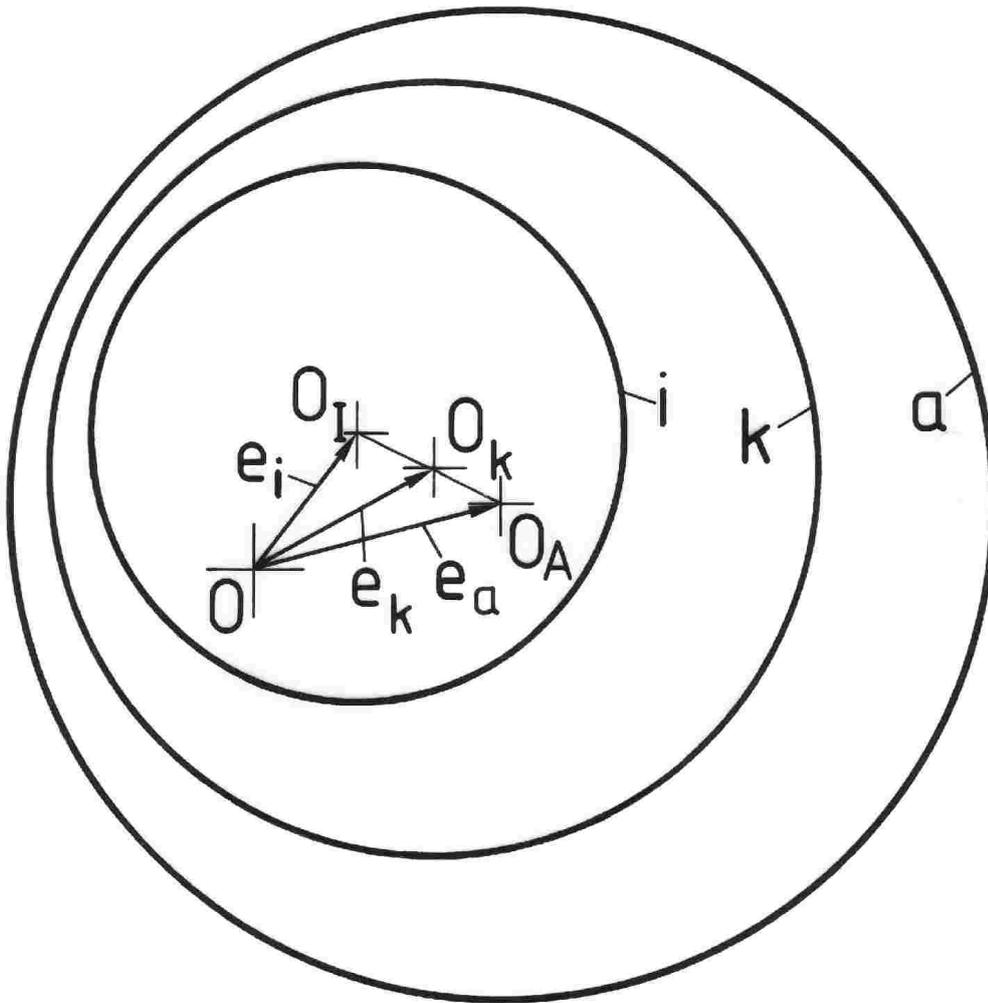


Bild 24: Käfigverlagerung

Für den Abstand r_{j0} des Wälzkörpermittelpunktes zum Lagermittelpunkt O_L gilt zunächst die Überlegung, daß bei stehendem Planetenradträger infolge der Umlaufgeschwindigkeit $\dot{\beta}_{0j}$ und der daraus resultierenden Fliehkräfte die Rollkörper sich außerhalb der Lastzone an die äußere Laufbahn anlegen. Nach Bild 25 gelten die Vektorgleichungen

$$\vec{r}_{0j} = \vec{e}_a + \vec{r}_a' \quad (87)$$

$$\Rightarrow r_{0j} \begin{pmatrix} \sin \beta_{0j} \\ \cos \beta_{0j} \end{pmatrix} = e_a \begin{pmatrix} \sin \beta_{ea} \\ \cos \beta_{ea} \end{pmatrix} + (r_a - r_w) \begin{pmatrix} \sin \beta_a' \\ \cos \beta_a' \end{pmatrix} \quad (88)$$

Nach Eliminieren von β_a' läßt sich Gleichung (88) nach r_{0j} auflösen :

$$r_{0j} = e_a \cos(\beta_{0j} - \beta_{ea}) + \sqrt{e_a^2 \cos^2(\beta_{0j} - \beta_{ea}) + r_a^2 - e_a^2}$$

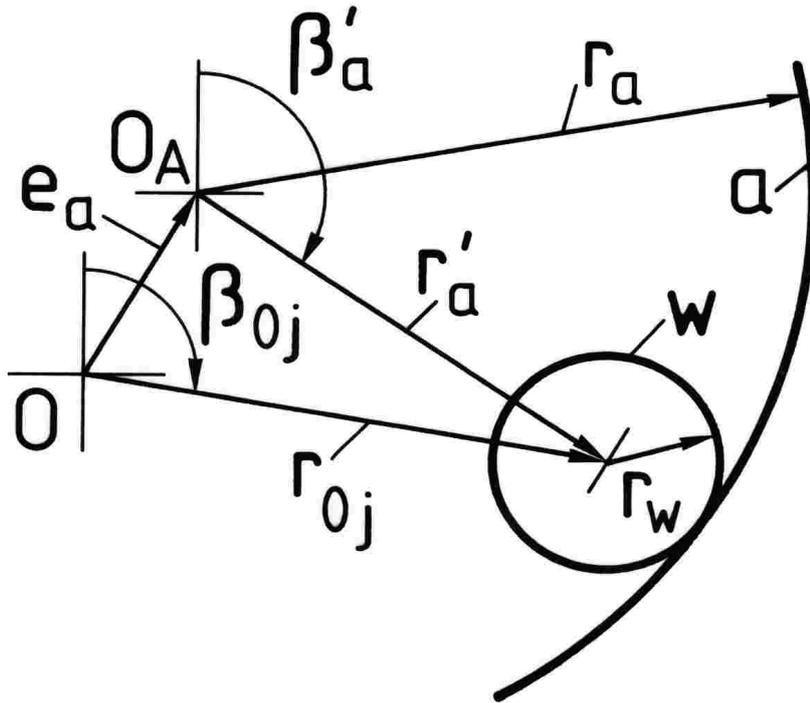


Bild 25: Bestimmung von \vec{r}_{0j} außerhalb der Lastzone

(89)

Ist bei drehendem Planetenradträger die Komponente der Resultierenden aus Führungs- und Coriolisbeschleunigung größer als die entgegengesetzt wirkende Radialbeschleunigung infolge der Lager - Eigenrotation, so legen sich dort die Wälzkörper an den Innenring. Die Grenzbedingung für diesen, im folgenden "Laufbahnwechsel" genannten Vorgang lautet mit den Bezeichnungen aus Abschnitt 5.2 entsprechend Gleichung (32)

$$\ddot{r} = \omega_{s0}^2 (r_{s0} \cos \beta + r) + 2\omega_{s0} r \dot{\beta}_{id} - \dot{\omega}_{s0} r_{s0} \sin \beta + r \dot{\beta}_{id}^2 = 0 \quad (90)$$

Für die Polarkoordinaten

$$\beta = \pi \quad (91)$$

$$r = r_{0j}(\beta) \quad (92)$$

und der Umlaufwinkelgeschwindigkeit der Rollkörper in einem idealen, schlupffreien Lager

$$\dot{\beta}_{id} = \frac{r_a \beta_a + r_i \beta_i}{r_a + r_i} \quad (93)$$

ergeben sich zwei Grenz-Winkelgeschwindigkeiten ω_{s0} des Planetenradträgers

$$\omega_{s0\ 1,2} = \frac{\dot{\beta}_{id}}{r - r_{s0}} \left(-r \pm \sqrt{r r_{s0}} \right) \quad (94)$$

bei deren Über- bzw. Unterschreitung ein Laufbahnwechsel der Wälzkörper auftritt. Um den Bereich β_{j1} bis β_{j2} , in dem sich dann die Rollkörper an den Innenring anlegen, zu erhalten, löst man Gleichung (90) nach β auf und erhält

$$\beta_{j\ 1,2} = \pi \pm \arcsin \left(-p + \sqrt{p^2 - q} \right) \quad (95)$$

mit

$$p = \frac{2c \dot{\omega}_{s0}}{\dot{\omega}_{s0}^2 + \omega_{s0}^4} \quad (96)$$

$$q = \frac{c^2 - \omega_{s0}^4}{\dot{\omega}_{s0}^2 + \omega_{s0}^4} \quad (97)$$

$$c = \frac{-r}{r_{s0}} \left(\omega_{s0}^2 + 2\omega_{s0} \dot{\beta}_{id} + \dot{\beta}_{id}^2 \right) \quad (98)$$

Für alle Lagewinkel β_{0j} , die die Bedingung

$$\beta_{j1} < \beta_{0j} < \beta_{j2} \quad (99)$$

erfüllen, paßt ein Startwert r_{0j} , der die Anlage am Innenring berücksichtigt (s. Gleichung (89))

$$r_{0j} = e_i \cos(\beta_{0j} - \beta_{ei}) + \sqrt{e_i^2 \cos^2(\beta_{0j} - \beta_{ei}) + r_i^2 - e_i^2} \quad (100)$$

In der Lastzone dringen die Rollkörper annähernd gleich tief in die Laufbahnen ein. Es gilt nach *Bild 26*

$$h_{0i} = h_{0a} \quad (101)$$

Diese Bedingung erfüllt der Schnittpunkt der mit β_{0j} vorgegebenen Richtung von r_{0j} mit dem Kreisbogen um die Spitze von \vec{r}_{ia} und dem Radius r_{id} :

$$\vec{r}_{0j} = \vec{e}_i + \vec{r}_{ia} + \vec{r}_{id} \quad (102)$$

mit

$$\vec{r}_{ia} = \frac{1}{2} \overrightarrow{O_I \vec{O}_A} \quad (103)$$

$$= \frac{1}{2} (\vec{e}_a - \vec{e}_i) \quad (104)$$

Nach Elimination des Winkels β' und Einsetzen der Gleichung (104) in (102) erhält man

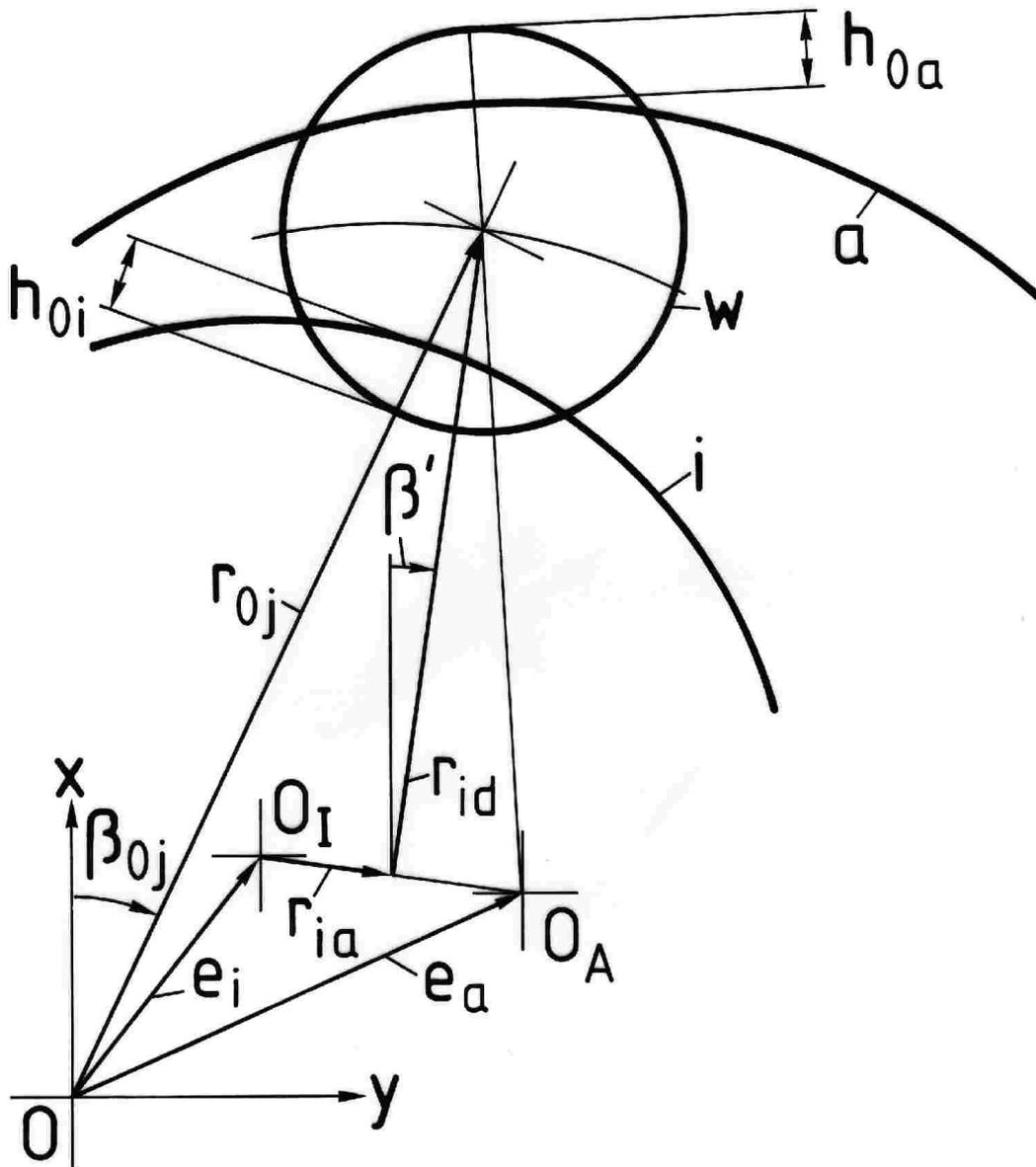


Bild 26: Bestimmung von \vec{r}_{0j} in der Lastzone

$$r_{0j} = (\vec{e}_i + \vec{r}_{ia}) \cdot \begin{pmatrix} \sin \beta_{0j} \\ \cos \beta_{0j} \end{pmatrix} + \sqrt{\left[(\vec{e}_i + \vec{r}_{ia}) \cdot \begin{pmatrix} \sin \beta_{0j} \\ \cos \beta_{0j} \end{pmatrix} \right]^2 - 2\vec{e}_i\vec{r}_{ia} - |\vec{e}_i|^2 - |\vec{r}_{ia}|^2 - |\vec{r}_{id}|^2}$$

(105)

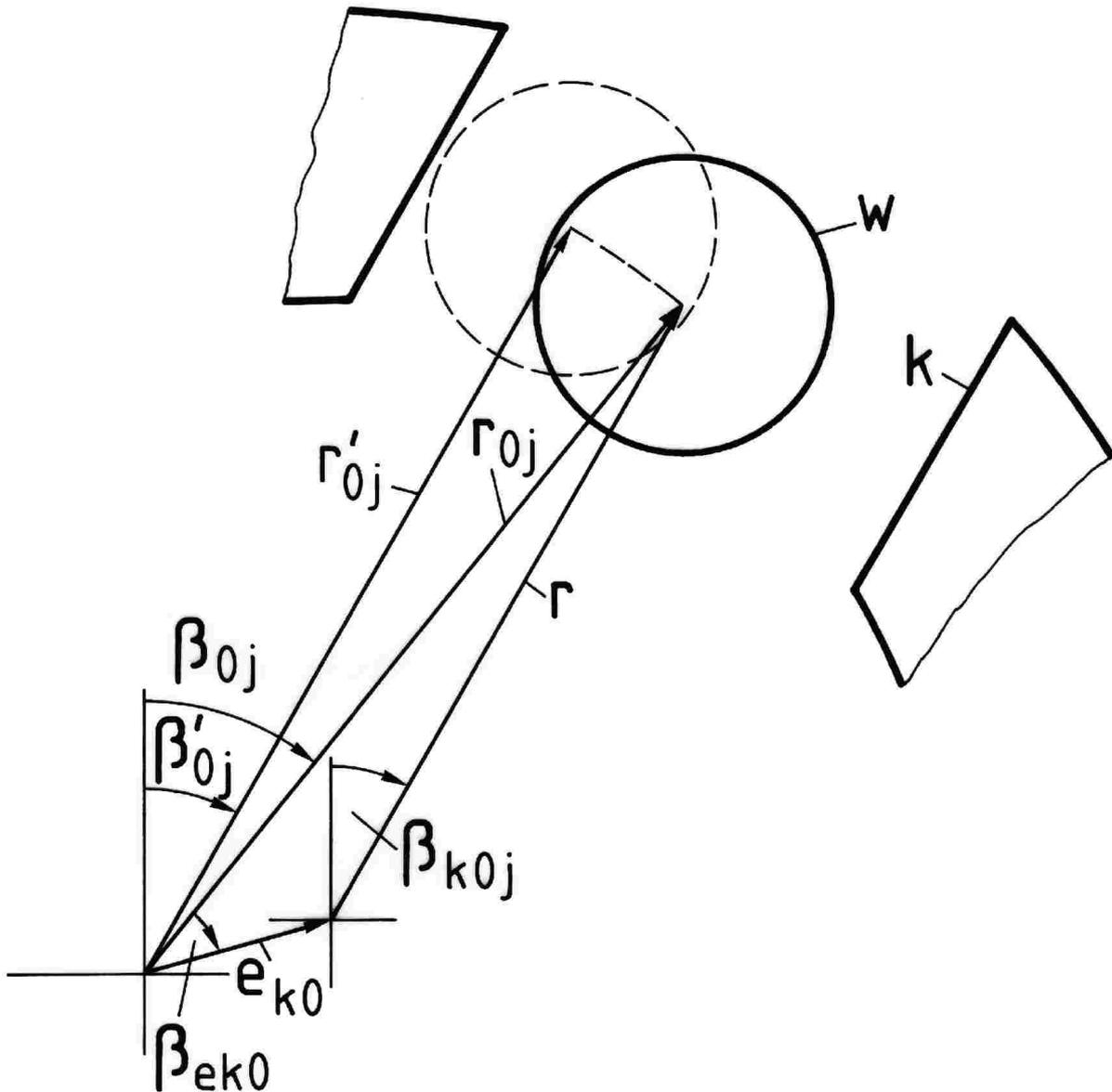


Bild 27: Korrektur von β_{0j}

Die Lagewinkel β_{0j} ergeben sich zunächst aus einer gleichmäßigen Verteilung der Rollkörper am Umfang :

$$\beta'_{0j} = \frac{\pi}{n_w} (2j - 1) \quad (106)$$

Wegen der Exzentrizität des Käfigs \vec{e}_{k0} liegen die nach Gleichung (106) berechneten Wälzkörpermittelpunkte jedoch nicht mittig in den Käfigtaschen. Es erfolgt deshalb eine Korrektur von β'_{0j} entsprechend Bild 27. Aus der Vektorgleichung

$$r_{0j} \begin{pmatrix} \sin \beta_{0j} \\ \cos \beta_{0j} \end{pmatrix} = e_{k0} \begin{pmatrix} \sin \beta_{ek0} \\ \cos \beta_{ek0} \end{pmatrix} + r \begin{pmatrix} \sin \beta_{k0j} \\ \cos \beta_{k0j} \end{pmatrix} \quad (107)$$

mit

$$r = -e_{k0} \cos(\beta_{ek0} - \beta_{k0j}) + \sqrt{e_{k0}^2 [\cos^2(\beta_{ek0} - \beta_{k0j}) - 1] + r_{0j}} \quad (108)$$

$$\beta_{k0j} = \alpha_{k0} (j - 1) \quad (109)$$

folgt für den korrigierten Winkel

$$\beta_{0j} = \arcsin \frac{e_{k0} \sin \beta_{ek0} + r \sin \beta_{k0j}}{r_{0j}} \quad (110)$$

Bei der Bestimmung der Winkelgeschwindigkeiten $\dot{\beta}_{0j}$ und $\dot{\alpha}_{0j}$ geht man von einem idealen, spiel- und schlupffreien Lager aus

$$\dot{\beta}_{0j} = \dot{\beta}_{id} \quad (111)$$

$$\dot{\alpha}_{0j} = \dot{\beta}_{0j} \left(\frac{r_i}{r_w} + 1 \right) - \frac{r_i}{r_w} \dot{\beta}_i \quad (112)$$

während die Radialgeschwindigkeiten \dot{r}_{0j} der Bedingung genügen sollen, daß Schmier-spalthöhenänderungen an innerer und äußerer Laufbahn gleich sind

$$\dot{h}_{0i} = \dot{h}_{0a} \quad (113)$$

Mit den Bezeichnungen nach *Bild 26* folgt dann

$$\begin{aligned} & \left(\sqrt{r_{0j}^2 + e_i^2 - 2r_{0j} e_i \cos(\beta_{ei} - \beta_{0j})} - r_i - r_w \right)^\circ \\ & = \left(r_a - r_w \sqrt{r_{0j}^2 + e_a^2 - 2r_{0j} e_a \cos(\beta_{ea} - \beta_{0j})} \right)^\circ \end{aligned} \quad (114)$$

und nach \dot{r}_{0j} aufgelöst

$$\dot{r}_{0j} = \frac{-r_{0j} \dot{\beta}_{0j} [e_i \sin(\beta_{ei} - \beta_{0j}) w_a + e_a \sin(\beta_{ea} - \beta_{0j}) w_i]}{[r_{0j} - e_i \cos(\beta_{ei} - \beta_{0j})] w_a + [r_{0j} - e_a \cos(\beta_{ea} - \beta_{0j})] w_i} \quad (115)$$

mit

$$w_a = \sqrt{r_{0j}^2 + e_i^2 - 2r_{0j} e_i \cos(\beta_{ei} - \beta_{0j})} \quad (116)$$

$$w_i = \sqrt{r_{0j}^2 + e_a^2 - 2r_{0j} e_a \cos(\beta_{ea} - \beta_{0j})} \quad (117)$$

Bild 28 zeigt den Anfangszustand eines Planetenradlagers mit den nach Gleichung (82) bis (110) berechneten Startwerten.

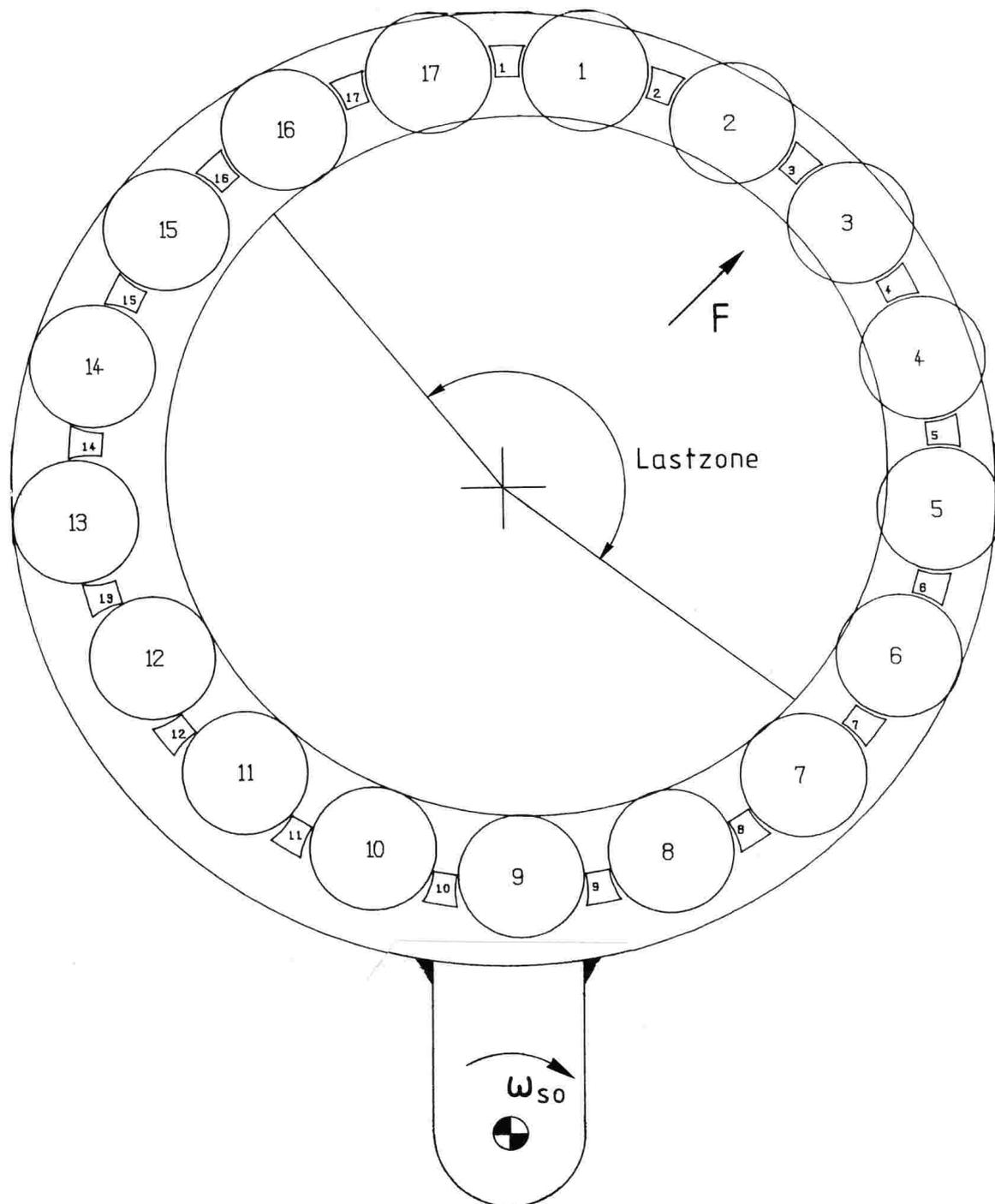


Bild 28: Anfangszustand eines Planetenradlagers nach den Gleichungen (82) bis (110)

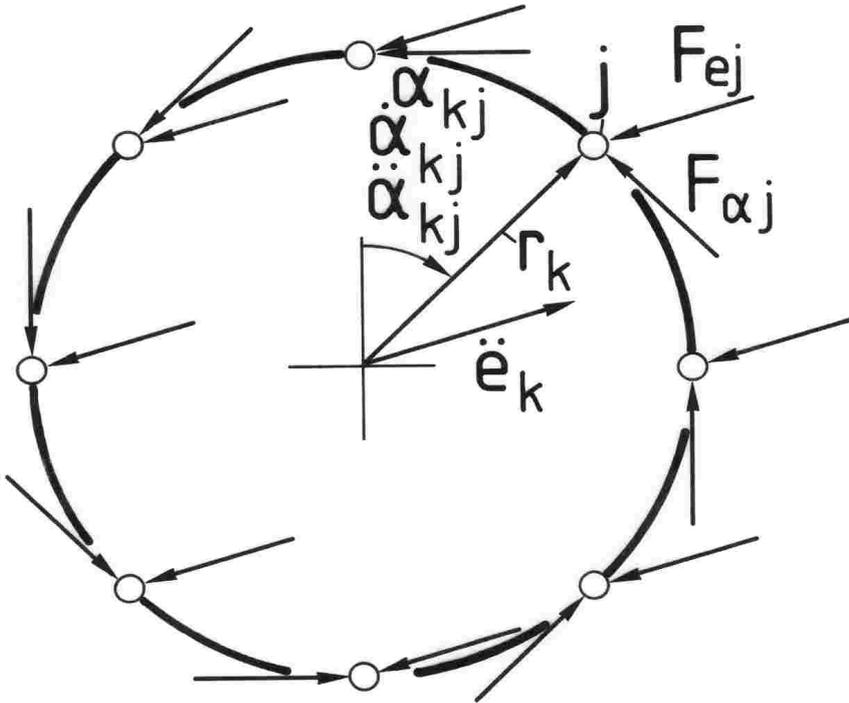


Bild 30: Trägheitskräfte am Käfig

6 Käfigverformungen

Massenkräfte des Käfigs sowie Stützkräfte von Führungsborden und Wälzkörpern bewirken eine Verformung des Käfigs. Abhängig von dem jeweiligen Beschleunigungszustand können in Planetenrad - Wälzlagern diese Formänderungen beachtliche Größenordnungen erreichen und das dynamische Verhalten des Lagers insgesamt beeinflussen. Die Veränderung der Schmierpaltgeometrie in den Kontaktstellen zwischen Käfig, Rollkörpern und Borden führt dort zu neuen EHD-Druckverläufen. Dabei wirken sich Abweichungen des Käfigringes von der Kreisform und Verdrehungen der Stege besonders stark aus, während die Durchbiegung der Stege wegen der bei zylindrischen Wälzkörpern - gleichmäßiges Breiten tragen vorausgesetzt - geringen Biegemomente vernachlässigbar ist. Bild 29 zeigt die äußeren, über das Schmiermittel übertragenen Kräfte, die eine radiale und tangential Belastung des Käfigringes und zusätzlich ein Moment

$$M = F_{y1t} h_{y1t} - F_{u1t} h_{u1} \quad (118)$$

hervorrufen.

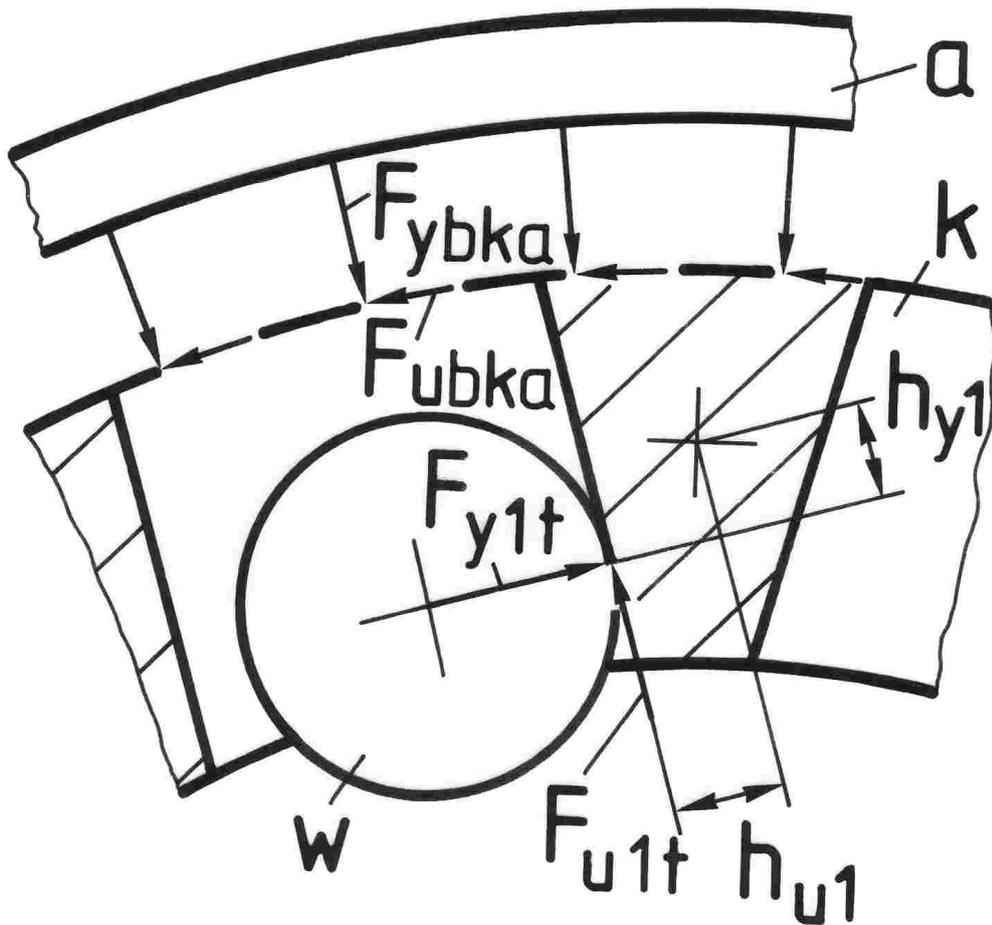


Bild 29: Äußere Kräfte des Käfigs

a Außenring

k Käfig

w Wälzkörper

F_{ybka} Druckkraft zwischen Bord und Käfig

F_{ubka} Reibkraft zwischen Bord und Käfig

F_{y1t} Druckkraft zwischen Wälzkörper und Steg

F_{u1t} Reibkraft zwischen Wälzkörper und Steg

h_y Hebelarm von F_{y1t}

h_u Hebelarm von F_{u1t}

Außerdem entstehen durch die allgemein beschleunigte Bewegung des Käfigschwerpunktes n am Umfang verteilte Trägheitskräfte nach Bild 30

$$\vec{F}_{ej} = -\frac{m_k}{n} \ddot{\vec{e}}_k \quad (119)$$

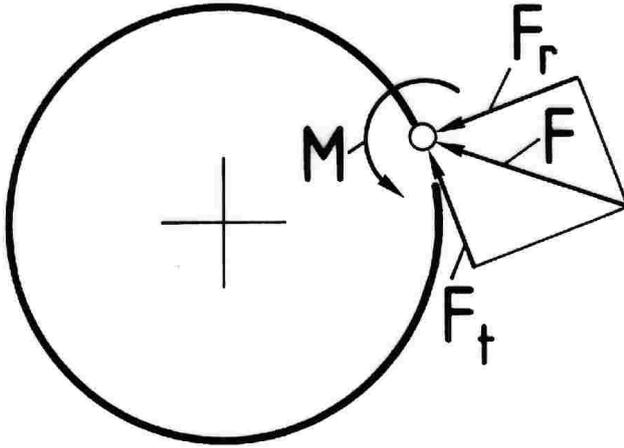


Bild 31: Belastung des Käfig-Ersatzringes

sowie infolge der Winkelbeschleunigung $\ddot{\alpha}_k$

$$\vec{F}_{\alpha j} = -\frac{m_k}{n} r_k \left[\ddot{\alpha}_{kj} \begin{pmatrix} +\cos \alpha_{kj} \\ -\sin \alpha_{kj} \end{pmatrix} - \dot{\alpha}_{kj}^2 \begin{pmatrix} \sin \alpha_{kj} \\ \cos \alpha_{kj} \end{pmatrix} \right] \quad (120)$$

6.1 Verformungsmodell

Innerhalb des ebenen, dynamischen Modells nach Abschnitt 5.1 erfaßt das Verformungsmodell des massebehafteten Käfigs den Einfluß von äußeren Kräften und Biegemomenten sowie von Trägheitskräften, die der Beschleunigung des Käfigs entgegengesetzt wirken. Für die Verformungsberechnung sind somit die Verschiebungen in radialer und tangentialer Richtung sowie die Biegelinie eines schweren Kreisringes mit der Masse m_k , dem Massenträgheitsmoment Θ_k , der Querschnittsfläche A und dem Elastizitätsmodul E des Käfigs zu ermitteln. Dazu ist der Käfig in das dynamische Gleichgewicht zu setzen. Bild 31 zeigt den allgemeinen Belastungsfall. Dabei greifen die Kräfte F und Momente M an beliebigen Punkten des Kreisringes an und rufen dort Verformungen hervor.

6.2 Lösungsverfahren

Für die Bestimmung der Verformungen bietet sich zunächst die Methode der finiten Elemente (FEM) an. Dabei wird der betrachtete, elastische Körper in eine Anzahl 'finiter Elemente' zerlegt, die über Knotenpunkte

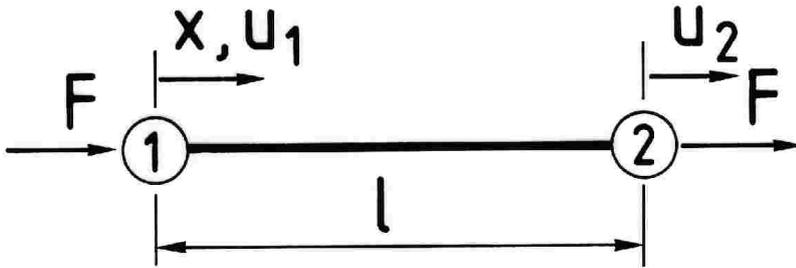


Bild 32: Stabelement

miteinander verbunden sind. Die Verschiebungen der Knotenpunkte stellen dann die grundlegenden unbekanntenen Größen des Systems dar. Innerhalb jedes Elementes legen günstig gewählte Funktionen in Abhängigkeit von den Knotenpunktverschiebungen den Verformungszustand fest. Die wirklich vorhandene Belastung überführt man in eine Ersatzbelastung an den Knotenpunkten. Zur Bestimmung der Knotenpunktverschiebungen ist ein Gleichungssystem zu lösen, dessen Größe von der Anzahl der Elemente abhängt [6]. Da aber in jedem Zeitschritt der Runge-Kutta Rechnung vier neue Verformungszustände des Käfigs auftreten, würde sich bei direkter Anwendung der Finite-Elemente-Methode der Aufwand für die Lager-Simulationsrechnung vervielfachen und die Anwendbarkeit überhaupt in Frage stellen. Einen Ausweg bietet hier die Verwendung von Einflußzahlen, die die Verformungen des Käfigringes unter einer "1"-Belastung beschreiben. Nach dem Superpositionsprinzip lassen sich dann bei geringem Rechenaufwand beliebig viele angreifende Kräfte berücksichtigen. Eine vor Beginn der Simulationsrechnung durchzuführende FEM-Rechnung liefert die benötigten Einflußzahlen für den betreffenden Käfig.

6.2.1 Finite-Elemente-Methode. Für die Verformungsrechnung mit Hilfe der Finite - Elemente - Methode idealisiert man den Käfig durch einen ebenen, massebehafteten Kreisring, der sich aus geraden, finiten Stab-Balken-Elementen zusammensetzt. Die allgemeine Bestimmungsgleichung

$$\underline{C} \underline{u} = \underline{F} \tag{121}$$

legt über die Steifigkeitsmatrix \underline{C} und den Lastvektor \underline{F} den gesuchten Verschiebungsvektor \underline{u} fest. \underline{F} enthält die an den Elementgrenzen angreifenden Kräfte und Momente, während \underline{C} die aus den Elementsteifigkeiten zusammengesetzte Bauteilsteifigkeit beschreibt.

Das in *Bild 32* dargestellte Stabelement mit den Knotenpunkten 1 und 2, der Länge l und der Elementkoordinate x erfährt unter Zug-Druckbelastung

an den Knotenpunkten Verschiebungen u_1 und u_2 in Längsrichtung. Bei linearem Ansatz gilt für die Verschiebung im Element näherungsweise

$$u(x) = N_1(x) u_1 + N_2(x) u_2 \quad (122)$$

worin die Formfunktionen N unter Berücksichtigung der Randbedingungen

$$N_1(x) = 1 - \frac{x}{l} \quad (123)$$

$$N_2(x) = \frac{x}{l} \quad (124)$$

betragen. Man ersetzt nun das in Wirklichkeit vorhandene Kontinuum durch eine endliche Anzahl finiter Elemente. Um den dabei zwangsläufig auftretenden Fehler zu minimieren, betrachtet man den Unterschied Π zwischen innerer und äußerer Arbeit des Systems

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \underline{\sigma}^T \underline{\epsilon} dV - \underline{u}^T \underline{F} \quad (125)$$

$\underline{\sigma}$ Spannungsmatrix

$\underline{\epsilon}$ Verzerrungsmatrix

Die Verzerrung des Stabelementes ist definiert durch

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{l} u_1 + \frac{1}{l} u_2 \quad (126)$$

oder in Matrixschreibweise

$$\underline{\epsilon} = \left(-\frac{1}{l} \quad \frac{1}{l} \right) \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \underline{B} \underline{u} \quad (127)$$

während für einen Stab aus isotropem Material

$$\underline{\sigma}^T = E \underline{\epsilon}^T \quad (128)$$

ohne Berücksichtigung der Querkontraktion ist. Differenzieren von Gleichung (125) liefert mit (127) und (128) das Minimum von Π

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \underline{u}^T} = E \int_V \underline{B}^T \underline{B} dV \underline{u} - \underline{F} = 0 \quad (129)$$

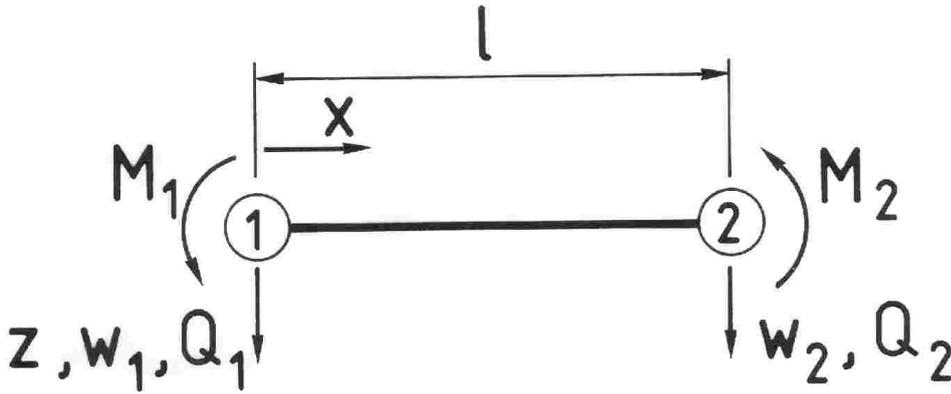


Bild 33: Balkenelement

Der Ausdruck $E \int_V \underline{B}^T \underline{B} dV$ beschreibt darin die Steifigkeit des betrachteten finiten Elementes und wird deshalb als Steifigkeitsmatrix \underline{C} bezeichnet

$$\underline{C} = E \int_V \underline{B}^T \underline{B} dV \quad (130)$$

Einsetzen von Gleichung (127) in (130) ergibt nach der Integration über das Stabvolumen

$$\underline{C} = E \begin{pmatrix} +\frac{1}{l^2} & -\frac{1}{l^2} \\ -\frac{1}{l^2} & +\frac{1}{l^2} \end{pmatrix} A l = \frac{EA}{l} \begin{pmatrix} +1 & -1 \\ -1 & +1 \end{pmatrix} \quad (131)$$

die Steifigkeitsmatrix des finiten Stabelementes.

Analog läßt sich die Steifigkeitsmatrix für ein finites Balkenelement herleiten. Hier wirken nach Bild 33 Querkräfte Q und Momente M an den Knotenpunkten und rufen dort Verschiebungen w in z - Richtung sowie Verdrehungen w' hervor. Ein kubischer Ansatz führt unter Berücksichtigung der Randbedingungen zu den Verformungen innerhalb des Elementes:

$$w(x) = N_1(x) w_1 + N_2(x) w'_1 + N_3(x) w_2 + N_4(x) w'_2 \quad (132)$$

mit

$$N_1(x) = 1 - \frac{3}{l^2} x^2 + \frac{2}{l^3} x^3 \quad (133)$$

$$N_2(x) = x - \frac{2}{l} x^2 + \frac{2}{l^2} x^3 \quad (134)$$

$$N_3(x) = \frac{3}{l^2} x^2 + \frac{2}{l^3} x^3 \quad (135)$$

$$N_4(x) = -\frac{1}{l} x^2 + \frac{1}{l^2} x^3 \quad (136)$$

Aus der elementaren Elasto-Statik der Platten [7] folgt für die Verzerrungen

$$\epsilon_{xx} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (137)$$

$$-z \left(\frac{\partial^2 N_1}{\partial x^2} \quad \frac{\partial^2 N_2}{\partial x^2} \quad \frac{\partial^2 N_3}{\partial x^2} \quad \frac{\partial^2 N_4}{\partial x^2} \right) \begin{pmatrix} w_1 \\ w'_1 \\ w_2 \\ w'_2 \end{pmatrix} \quad (138)$$

$$\epsilon_{xx} = \underline{B} \underline{w} \quad (139)$$

Einsetzen von Gleichung (139) bzw. (138) in (130) liefert für das Element der Zeile i und der Spalte j der Steifigkeitsmatrix \underline{C}

$$c_{ij} = E \int_v z^2 \left(\frac{\partial^2 N_i}{\partial x^2} \quad \frac{\partial^2 N_j}{\partial x^2} \right) dV \quad (140)$$

und schließlich nach Ausführung der Integration die Steifigkeitsmatrix für das Balkenelement

$$\underline{C} = \frac{E I_{yy}}{l^3} \begin{pmatrix} +12 & +61 & -12 & +61 \\ +61 & +41^2 & -61 & +21^2 \\ -12 & -61 & +12 & -61 \\ +61 & +21^2 & -61 & +41^2 \end{pmatrix} \quad (141)$$

mit dem Flächenmoment 2. Grades I_{yy}

$$J_{yy} = \int_A z^2 dA \quad (142)$$

Die Überlagerung von Normalkraft, Querkraft und Biegung aus den Gleichungen (131) und (141) ergibt eingesetzt in (121) die Bestimmungsgleichung für die Verformungen eines finiten Stab-Balken-Elementes

$$\frac{E}{l^3} \begin{pmatrix} Al^2 & 0 & 0 & -Al^2 & 0 & 0 \\ 0 & 12J & 6Jl & 0 & -12J & 6Jl \\ 0 & 6Jl & 4Jl^2 & 0 & -6Jl & 2Jl^2 \\ -Al^2 & 0 & 0 & Al^2 & 0 & 0 \\ 0 & -12J & -6Jl & 0 & 12J & -6Jl \\ 0 & 6Jl & 2Jl^2 & 0 & -6Jl & 4Jl^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ w_1 \\ w'_1 \\ u_2 \\ w_2 \\ w'_2 \end{pmatrix}$$

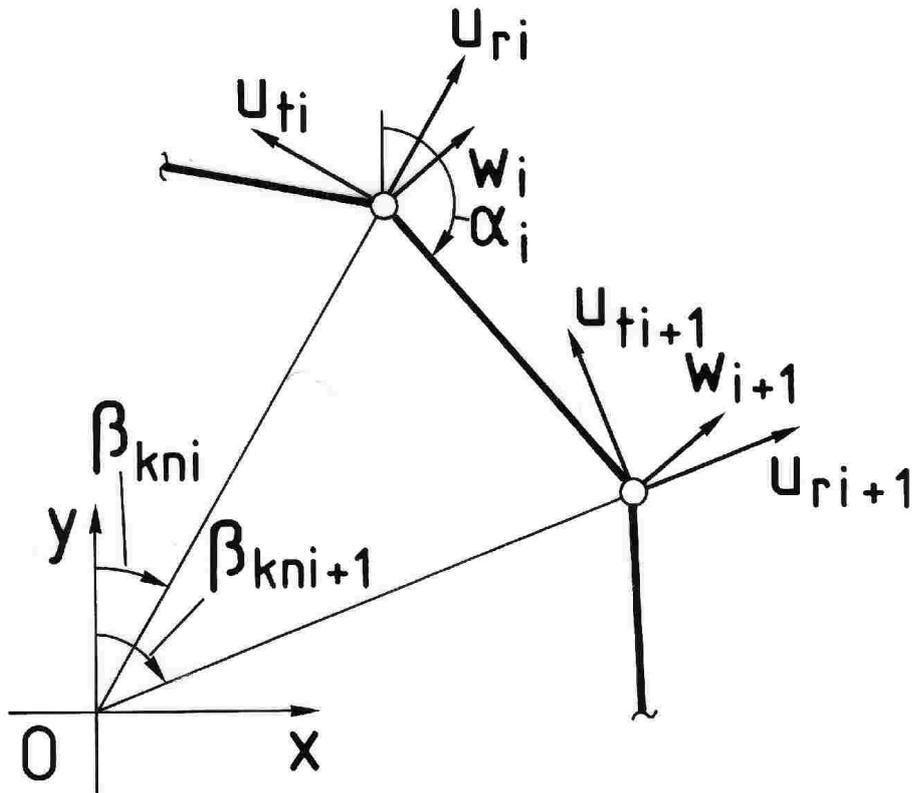


Bild 34: Gesamtsystem mit globalen und lokalen Verschiebungen

$$= \begin{pmatrix} N_1 \\ Q_1 \\ M_1 \\ N_2 \\ Q_2 \\ M_2 \end{pmatrix} \quad (143)$$

Die auf Elementebene aufgestellte Gleichung (143) muß nun durch Verknüpfung der einzelnen Elemente in eine das Gesamtsystem nach *Bild 34* beschreibende Gleichung überführt werden. Die Richtung des lokalen Verschiebungsvektors \underline{u} bezieht sich auf die Stabachse. Für die Umrechnung auf radiale und tangentiale Richtung des Ersatzringes ist eine Koordinatentransformation von \underline{u} notwendig. Aus *Bild (34)* folgt

$$\underline{u}_{global} = \underline{T} \cdot \underline{u}_{lokal} \quad (144)$$

oder

$$\begin{pmatrix} u_{r\ i} \\ u_{t\ i} \\ w'_i \\ u_{r\ i+1} \\ u_{t\ i+1} \\ w'_{i+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_{21} & T_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{44} & T_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{54} & T_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_i \\ w_i \\ w'_i \\ u_{i+1} \\ w_{i+1} \\ w'_{i+1} \end{pmatrix} \quad (145)$$

mit den Elementen der Matrix \underline{T}

$$T_{11} = + \cos(\alpha_i - \beta_{kn\ i}) \quad (146)$$

$$T_{12} = + \sin(\alpha_i - \beta_{kn\ i}) \quad (147)$$

$$T_{21} = - \sin(\alpha_i - \beta_{kn\ i}) \quad (148)$$

$$T_{22} = + \cos(\alpha_i - \beta_{kn\ i}) \quad (149)$$

$$T_{44} = + \cos(\alpha_i - \beta_{kn\ i+1}) \quad (150)$$

$$T_{45} = + \sin(\alpha_i - \beta_{kn\ i+1}) \quad (151)$$

$$T_{54} = - \sin(\alpha_i - \beta_{kn\ i+1}) \quad (152)$$

$$T_{55} = - \cos(\alpha_i - \beta_{kn\ i+1}) \quad (153)$$

Dann folgt mit den bekannten Methoden [6] die Kopplung der Elemente zu einem Ersatzring und die Einarbeitung der Randbedingungen in die Gesamtsteifigkeitsmatrix. Die Einflußzahlen für die Käfigverformungen ergeben sich aus den Verschiebungen des Ersatzringes unter "1"-Belastungen. Nach dem Superpositionsprinzip lassen sich dann die Verschiebungen aus beliebigen Kräften und Momenten überlagern.

Bild 35 zeigt das FEM-Modell unter Einwirkung einer radialen Einheitslast. Um ein statisch bestimmtes Modell zu gewährleisten, wird der Kraftangriffspunkt (Knoten 1) dreiwertig gelagert. Die eigentliche Belastung des Ersatzringes erfolgt dann durch die der Radialkraft das Gleichgewicht haltenden Trägheitskräfte an den einzelnen Knotenpunkten. Bei einer auf n_{kn} Knotenpunkte gleichmäßig verteilten Käfigmasse hat jede Trägheitskraft F_i den Betrag

$$F_i = \frac{"1"}{n_{kn}} \quad (154)$$

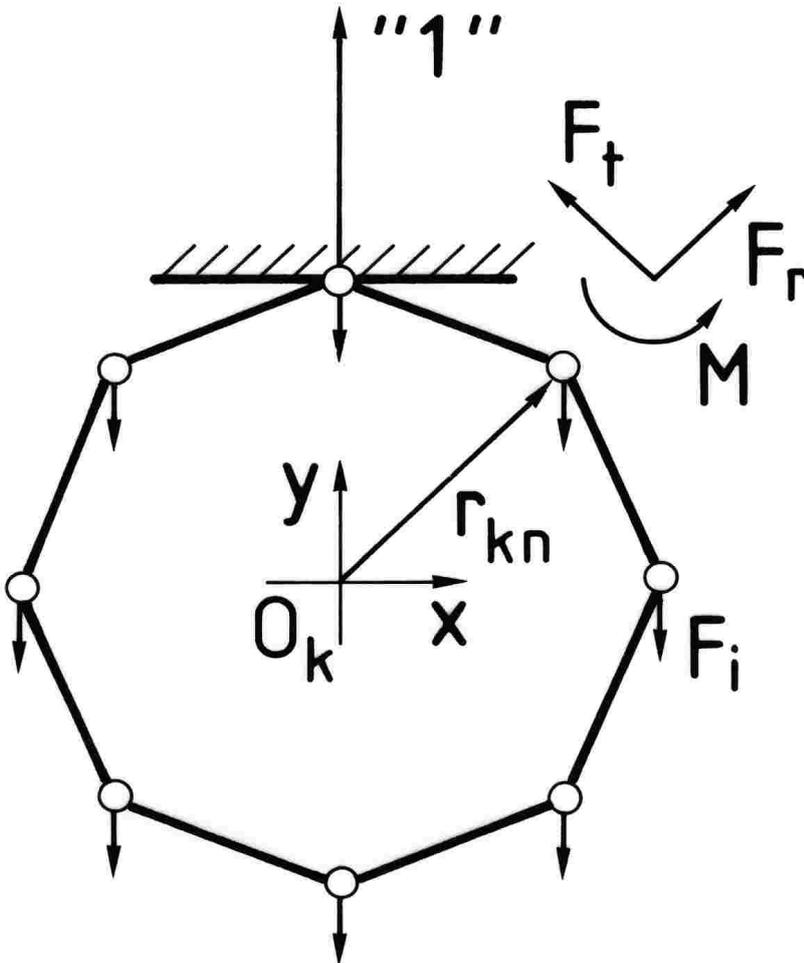


Bild 35: Belastung des Ersatzringes durch eine radiale Einheitskraft

Für die Verformungsrechnung zerlegt man die Knotenpunktkräfte in Komponenten radial und tangential zum Ersatzring und erhält so die Verformungen an den einzelnen Knoten. In dem vorgestellten FEM-Modell ist aber der Knoten, an dem die Einheitskraft angreift, eingespannt und eine Verschiebung deshalb nicht möglich. Innerhalb des dynamischen Modells nach Abschnitt 5.1 muß aber gerade im Kraftangriffspunkt am Käfig die größte Verformung auftreten, während der gegenüber am weitesten entfernt liegende Knotenpunkt den Ersatzring in das dynamische Gleichgewicht setzt und deshalb selbst keine Verschiebungen erfährt. Durch eine geeignete Koordinatentransformation wird deshalb der verformte Käfig so verschoben, daß diese Bedingungen erfüllt sind. Diese Vorgehensweise liefert die Einflußzahlen für radiale und tangentiale Verschiebungen sowie Verdrehungen der Knoten bei Belastung des Käfigs.

Auch unter Einwirkung einer tangentialen Einheitskraft halten, wie *Bild 36* verdeutlicht, die Massenkräfte der Stäbe den Ring im Gleichgewicht. Die

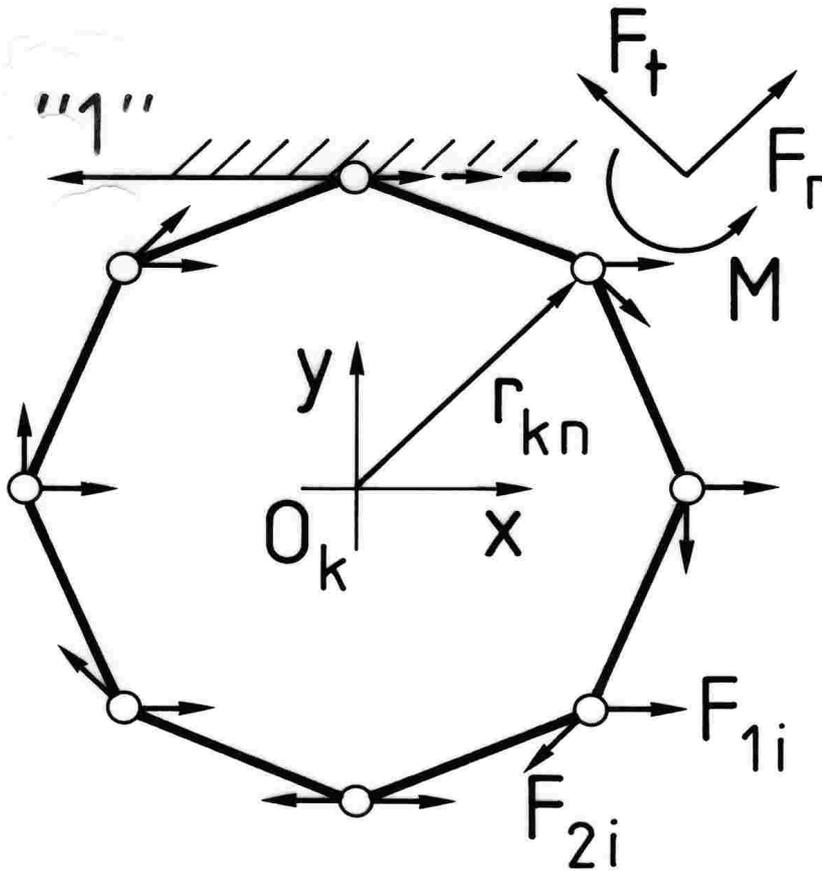


Bild 36: Belastung des Ersatzringes durch eine tangentielle Einheitskraft

Tangentialkraft ruft sowohl eine translatorische als auch eine rotatorische Bewegung des Käfigs hervor. Bei Translation erzeugen alle Stäbe die gleiche Reaktionskraft

$$F_{1i} = \frac{"1"}{n_{kn}} \quad (155)$$

während unter Berücksichtigung des Momentengleichgewichtes

$$\sum_{i=1}^{n_{kn}} r_{kn} F_{2i} = "1" \cdot r_{kn} \quad (156)$$

für die der Rotation entgegengesetzt wirkenden Trägheitskräfte gilt

$$F_{2i} = \frac{"1"}{n_{kn}} \quad (157)$$

Die von diesen Kräften hervorgerufenen Verformungen erfahren, wie für radiale Last beschrieben, eine Koordinatentransformation durch Verschieben des verformten Ringes.

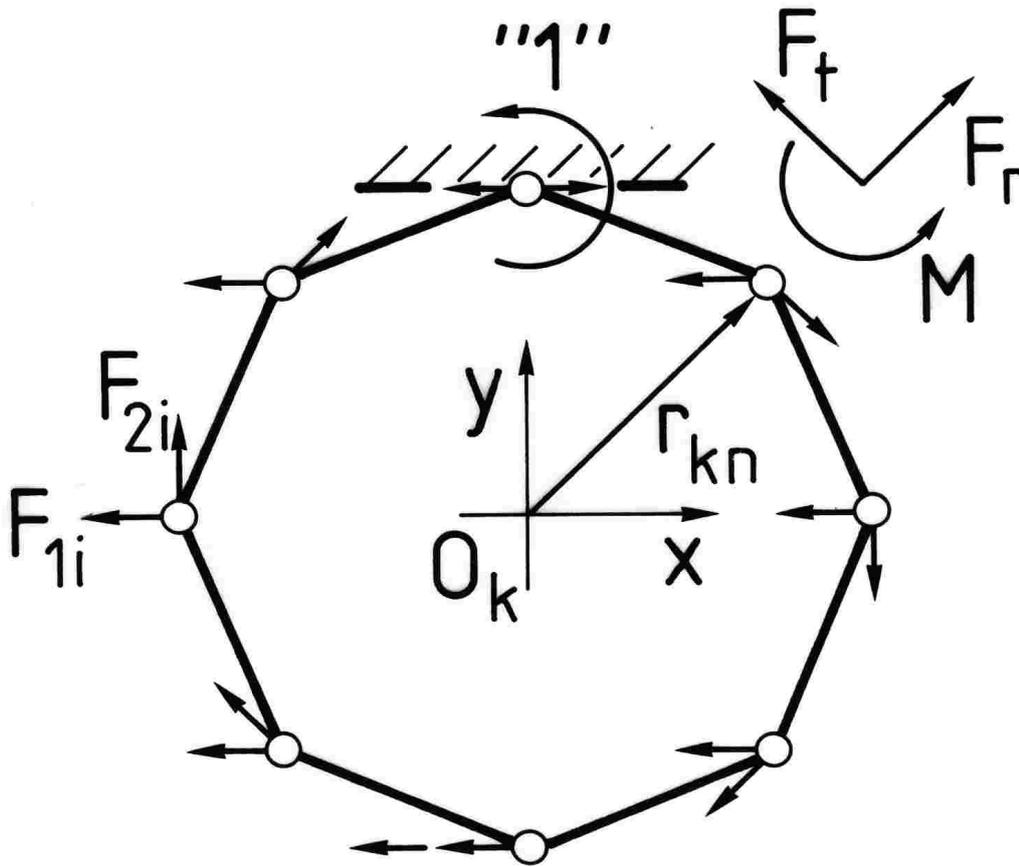


Bild 37: Belastung des Ersatzringes durch ein Einheitsmoment

Ein an dem Ersatzring aufgebrachtes Biegemoment mit dem Betrag $"1"$ ruft eine rotatorische und eine translatorische Bewegung des Käfigs hervor. Mit Bild 37 liefert das Momentengleichgewicht

$$\sum_{i=1}^{n_{kn}} r_{kn} F_{2i} = "1" \quad (158)$$

die Massenkräfte

$$|F_{1i}| = |F_{2i}| = \frac{"1"}{n_{kn} r_{kn}} \quad (159)$$

Die eigentliche FEM-Rechnung besteht in der Lösung des linearen, inhomogenen Gleichungssystems (121). Der Rang der Steifigkeitsmatrix \underline{C} beträgt bei n Knotenpunkten $r = 3n$, d.h. es liegen $9n^2$ Elemente vor. Durch Ausnutzung von Symmetrie und Bandbreite läßt sich der Speicherbedarf auf $9n$ Elemente reduzieren. Die elementaren Methoden zur Lösung

von linearen Gleichungssystemen erfordern zum Teil eine erhebliche Anzahl von Rechenoperationen, die sich durch Rundungsfehler stark auf die Qualität der Lösung auswirken. So benötigt für die Lösung eines $n \times n$ -Gleichungssystems das Verfahren nach

Gauß	$\frac{n}{3}(n^2 + 3n - 1)$
Cholesky	$\frac{n^3}{6} + \frac{3}{2}n^2 + \frac{3}{2}n$
Cramersche Regel	$(n^2 - 1)n! + n$
Gauß-Jordan	$\frac{n}{2}(n^2 + 2n + 1)$

Rechenoperationen. Um jedoch eine möglichst hohe Genauigkeit bei vergleichsweise geringem Rechenaufwand zu gewährleisten, wird hier ein Iterationsverfahren, die "conjugate gradient method" nach Hestenes [8] verwendet. Im Gegensatz zu herkömmlichen Gleichungslösern kompensiert die cg-Methode während der Iteration aufgetretene Rundungsfehler, so daß die Genauigkeit der Lösung hauptsächlich von der Anzahl der im Rechner darstellbaren Stellen abhängt. Allerdings hängt auch die Konvergenz des Verfahrens stark von der Rechengenauigkeit der Anlage ab. Es empfiehlt sich deshalb, mit der maximal verfügbaren Stellenzahl zu arbeiten. Die cg-Iteration erreicht dann in einem Bruchteil der Rechenzeit die gleiche Genauigkeit wie z.B. der Gaußalgorithmus.

Die conjugate-gradient-Methode sei darum im folgenden an einem einfachen Beispiel beschrieben. Die Bestimmung des Schnittpunktes zweier Geraden in der x,y -Ebene

$$f_I(x) = y_I = a_I x + b_I \tag{160}$$

$$f_{II}(x) = y_{II} = a_{II} x + b_{II} \tag{161}$$

führt auf das Gleichungssystem

$$\begin{pmatrix} a_I & 1 \\ a_{II} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_I \\ b_{II} \end{pmatrix} \tag{162}$$

oder

$$\underline{A} \underline{x} = \underline{b} \tag{163}$$

mit den Unbekannten \underline{x} . Dann maximiert nach [8] der Lösungsvektor \underline{x} die Funktion

$$F(x, y) = F(\underline{x}) = -|(\underline{A} \underline{x} - \underline{b})^T \cdot \underline{A}^{-1} \cdot (\underline{A} \underline{x} - \underline{b})| \tag{164}$$

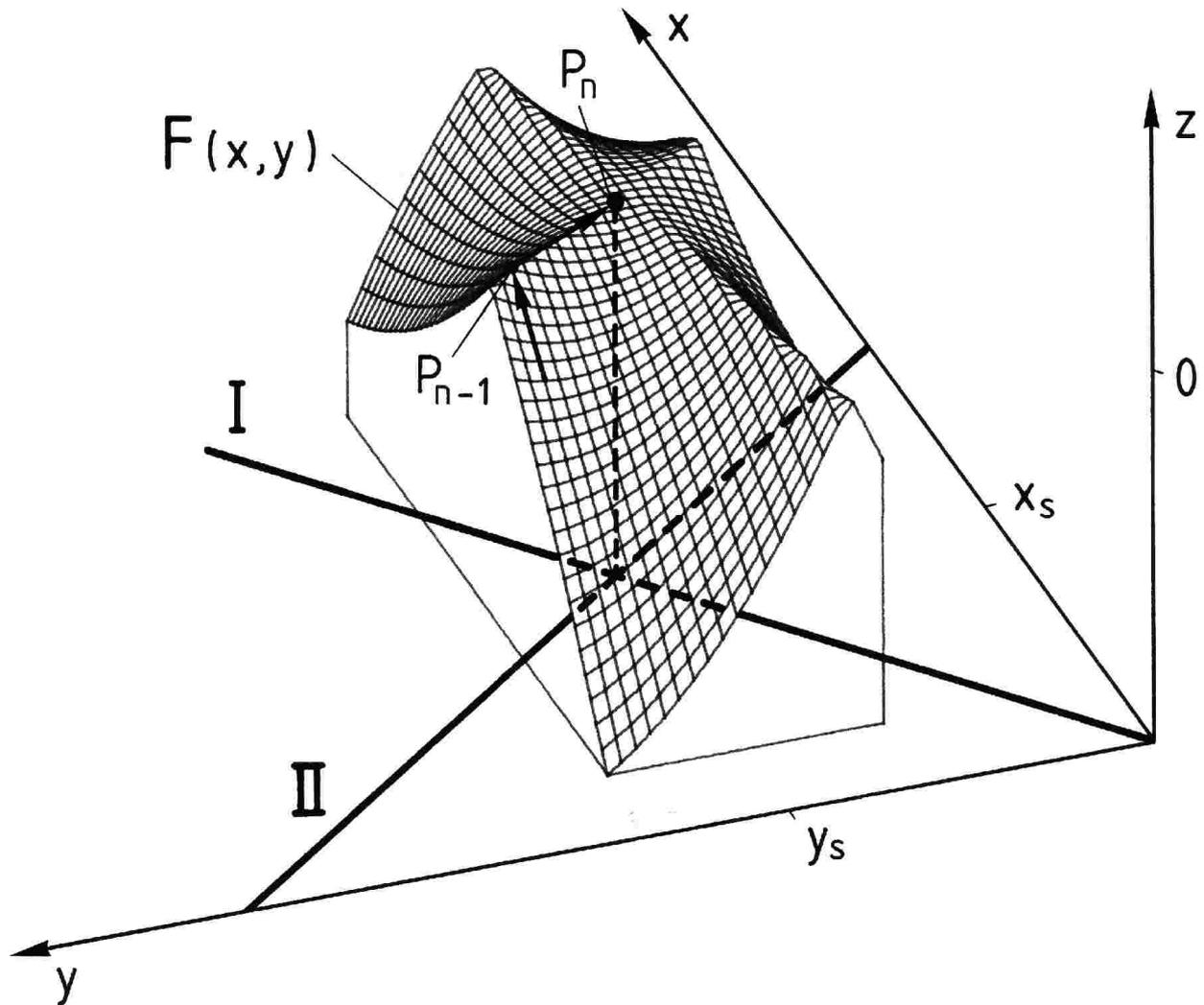


Bild 38: cg-Methode (Beispiel)

Der skalare Wert $F(\underline{x})$ verhält sich umgekehrt proportional zum Abstand der beiden Geraden voneinander. Bild 38 veranschaulicht den Zusammenhang. Die Funktion $F(x,y)$ ist geometrisch deutbar als Fläche über den Geraden I und II. Mit den Koordinaten des Schnittpunktes (x_s, y_s) erreicht $F(\underline{x})$ sein Maximum und es gilt

$$F(x_s, y_s) = 0 \tag{165}$$

Die Lösung des Gleichungssystems (162) beschränkt sich also auf die Suche nach dem Maximalwert von F . Dazu wählt man einen Startvektor \underline{x}_0 und bestimmt den zugehörigen Wert $F(\underline{x}_0)$. In jedem folgenden Iterationsschritt geht man um einen bestimmten Betrag in die Richtung des größten Anstiegs

der Fläche im Punkt $F(\underline{x})$ und gelangt so zu einem neuen Punkt \underline{x} der x,y-Ebene. Ist die Abweichung $\underline{A} \underline{x} - \underline{b}$ kleiner als eine vorgegebene Fehlergrenze, hat man die Lösung \underline{x} erreicht. Bei dem Beispiel in *Bild 38* gelangt man mit dem letzten Iterationsschritt von dem Punkt $P(x_{n-1}, y_{n-1}, z_{n-1})$ zu dem Maximalwert $P(x_n, y_n, z_n)$, der genau über dem Schnittpunkt (x_s, y_s) der Geraden liegt.

Numerische Ungenauigkeiten können sich nicht fortpflanzen, da die Richtung zu dem höchsten Punkt der Fläche in jedem Iterationsschritt neu berechnet wird.

Die zweidimensionale Betrachtung läßt sich auf den n - dimensionalen Fall ausdehnen. Dann ist der Lösungsvektor \underline{x} der Schnittpunkt von n Ebenen in einem n -dimensionalen Raum. Hestenes gibt dazu den in *Bild 39* dargestellten Algorithmus an.

6.2.2 Kraftgrößenverfahren. Einflußzahlen für die Verschiebungen und Verdrehungen der Knoten erhält man bei der Belastung des Ersatzringes mit "1"-Kräften, bzw. "1"-Momenten. Eine FEM-Rechnung ergibt in allen drei Fällen radiale und tangential Verschiebungen sowie Verdrehungen der n_{kn} Knoten. Für jeden Belastungsfall ergeben sich an jedem Knoten drei Einflußzahlen. Das elastische Verhalten des betrachteten Käfigs wird also durch $3 \cdot 3 \cdot n_{kn}$ Einflußzahlen δ beschrieben. Greifen nach *Bild 40* an verschiedenen Knoten Kräfte und Momente gleichzeitig an, so überlagern sich die Verschiebungen der einzelnen Knoten.

Zunächst teilt man die Kräfte in radiale und tangentiale Komponenten auf. Dann ist die Verschiebung u_{rj} des Knotens j in radialer Richtung

$$u_{rj} = u_{rj}(F_j, M_j) + u_{rj}(F_{j+1}, M_{j+1}) \quad (166)$$

$$\begin{aligned} u_{rj} = & F_{rj} \cdot \delta_{rrk} + F_{tj} \cdot \delta_{trk} + M_j \cdot \delta_{mrk} \\ & + F_{rj+1} \cdot \delta_{rrl} + F_{tj+1} \cdot \delta_{trl} + M_{j+1} \cdot \delta_{mrl} \end{aligned} \quad (167)$$

in tangentialer Richtung

$$u_{tj} = u_{tj}(F_j, M_j) + u_{tj}(F_{j+1}, M_{j+1}) \quad (168)$$

$$\begin{aligned} u_{tj} = & F_{rj} \cdot \delta_{rtk} + F_{tj} \cdot \delta_{ttk} + M_j \cdot \delta_{mtk} \\ & + F_{rj+1} \cdot \delta_{rtl} + F_{tj+1} \cdot \delta_{ttl} + M_{j+1} \cdot \delta_{mtl} \end{aligned} \quad (169)$$

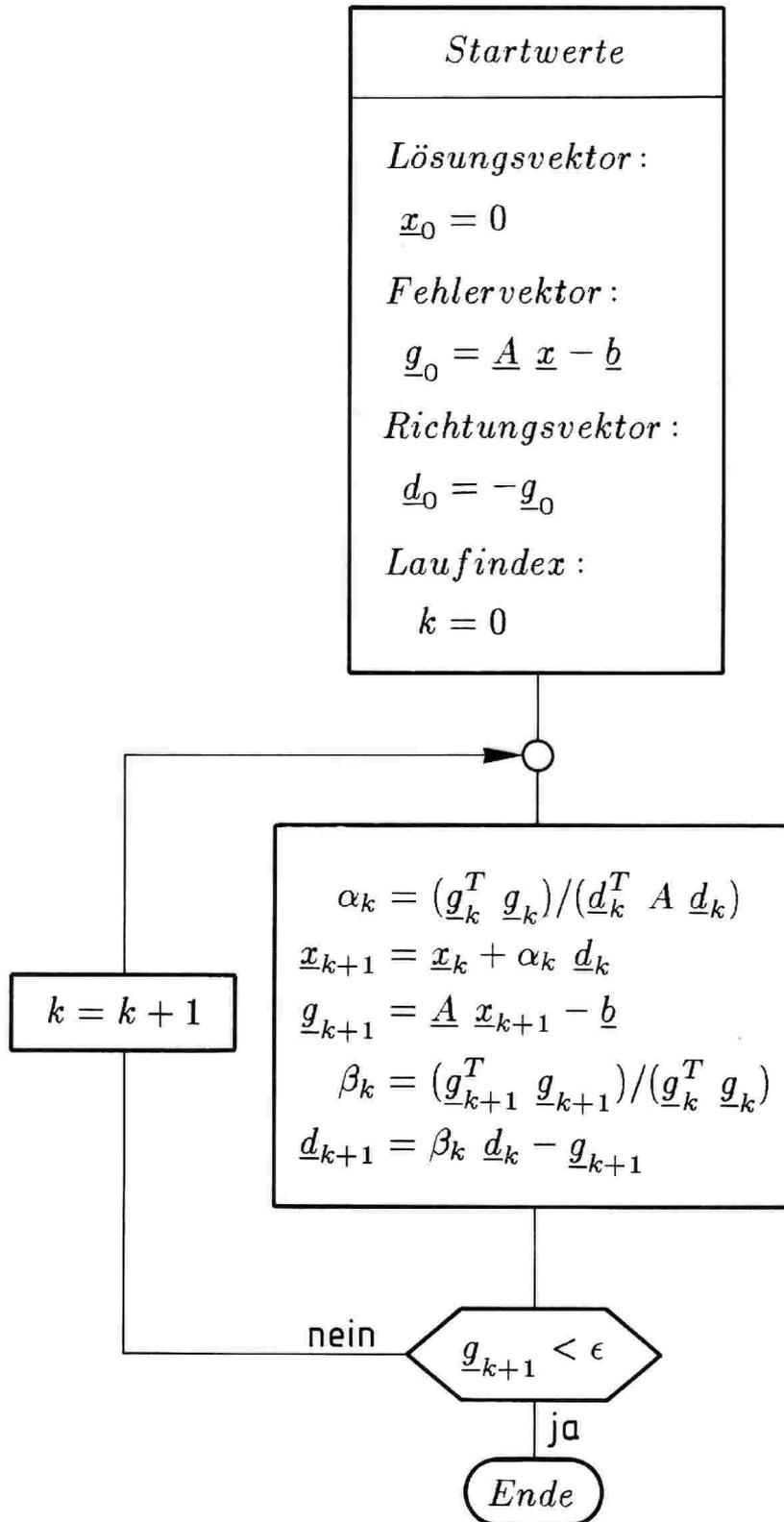


Bild 39: cg-Algorithmus

und die Verdrehung des Knotens j

$$u_{m\ j} = u_{m\ j}(F_j, M_j) + u_{m\ j}(F_{j+1}, M_{j+1}) \quad (170)$$

$$\begin{aligned} u_{m\ j} = & F_{r\ j} \cdot \delta_{rm\ k} + F_{t\ j} \cdot \delta_{tm\ k} + M_j \cdot \delta_{mm\ k} \\ & + F_{r\ j+1} \cdot \delta_{rm\ l} + F_{t\ j+1} \cdot \delta_{tm\ l} + M_{j+1} \cdot \delta_{mm\ l} \end{aligned} \quad (171)$$

Die Einflußzahlen δ bedeuten im einzelnen

δ_{rr}	radiale Verschiebung infolge radialer Belastung
δ_{rt}	tangentiale Verschiebung infolge radialer Belastung
δ_{rm}	Verdrehung infolge radialer Belastung
δ_{tr}	radiale Verschiebung infolge tangentialer Belastung
δ_{tt}	tangentiale Verschiebung infolge tangentialer Belastung
δ_{tm}	Verdrehung infolge tangentialer Belastung
δ_{mr}	radiale Verschiebung infolge Biegemoment
δ_{mt}	tangentiale Verschiebung infolge Biegemoment
δ_{mm}	Verdrehung infolge Biegemoment

Die Indizes k und l berücksichtigen die notwendige Rückdrehung des Kraftangriffspunktes, wenn die betrachtete Kraft nicht am Knoten 1 angreift. Die *Bilder* 42 bis 45 zeigen die Verformungen eines Käfigs nach *Bild* 41 aus glasfaserverstärktem Polyamid (Elastizitätsmodul = $7500\ N/mm^2$) unter verschiedenen Einzellasten. Die an jedem Steg angreifenden Trägheitskräfte setzen den Käfig in das dynamische Gleichgewicht. In *Bild* 46 verformen an den Stegen angreifende Biegemomente, die nach den Gleichungen (168) bis (171) überlagert wurden, den Käfig.

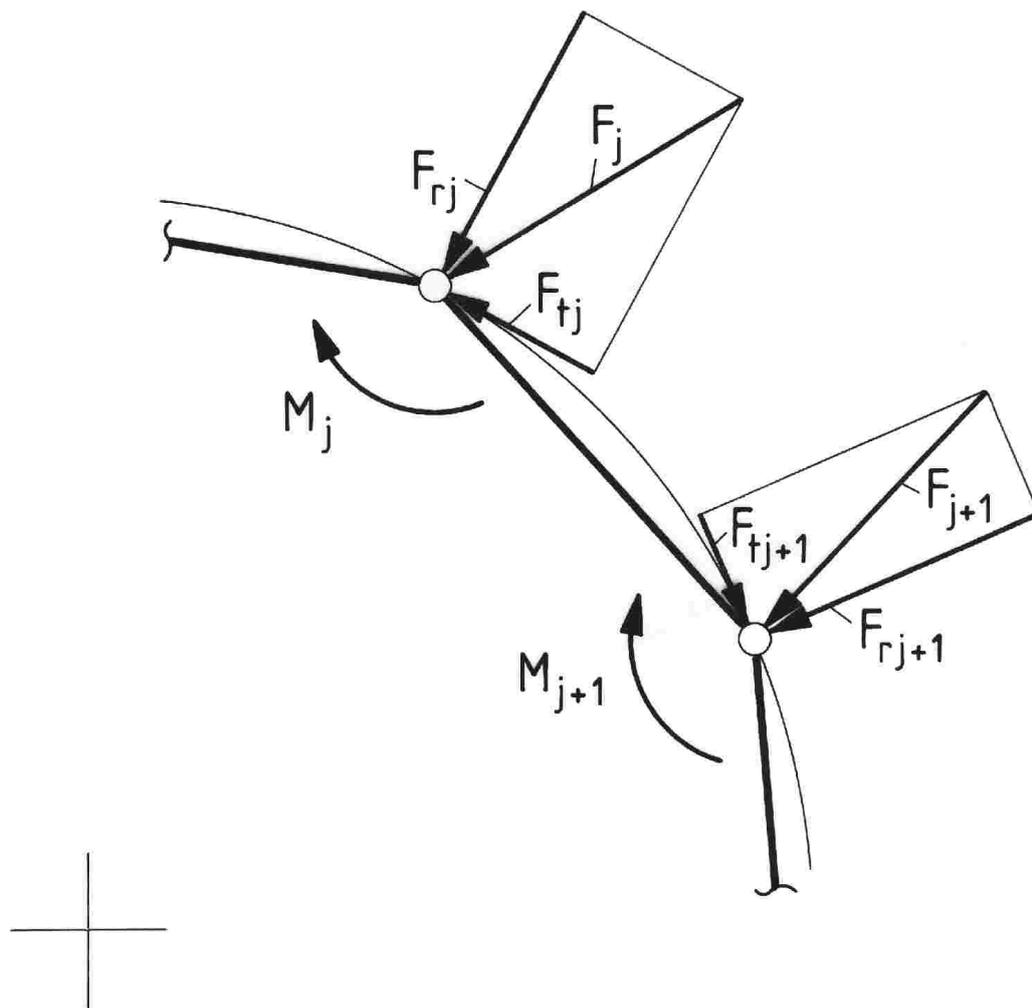


Bild 40: Mit Kräften und Momenten belasteter Ersatzring

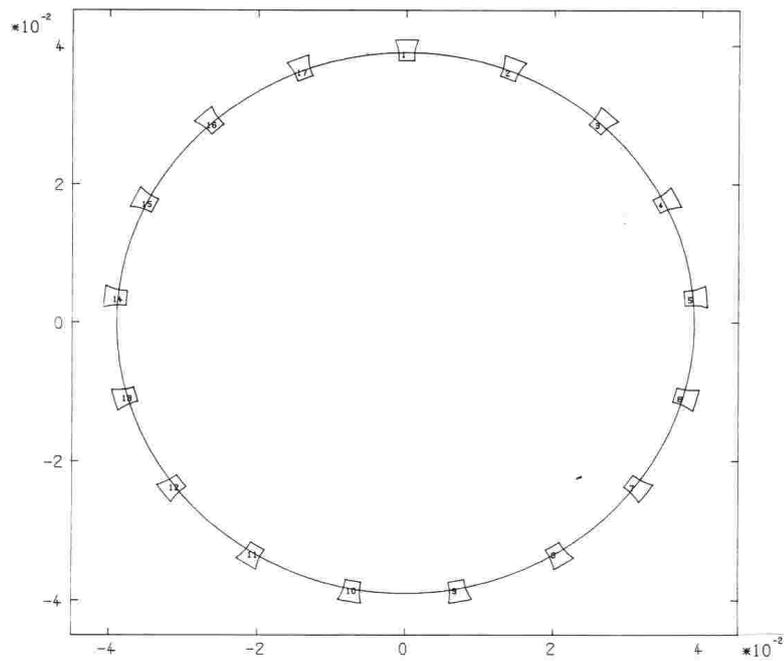


Bild 41: Unverformter Käfig

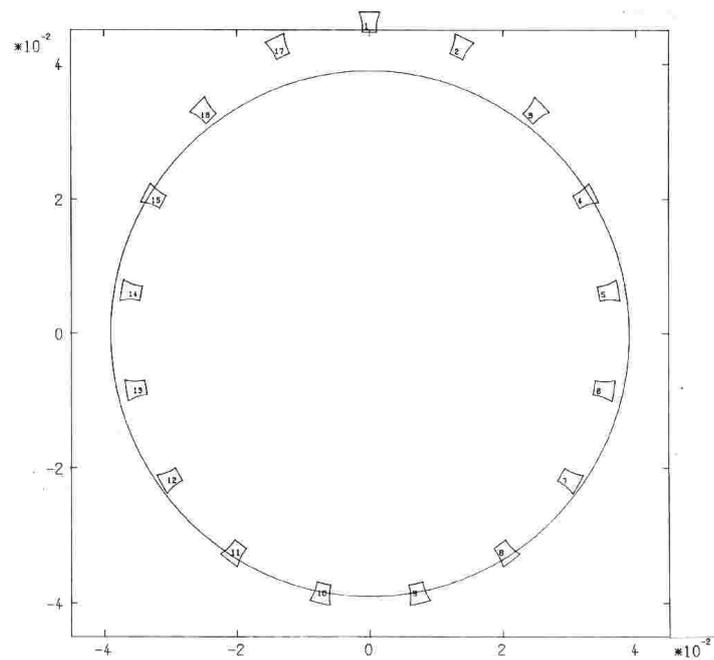


Bild 42: Radialkraft ($F = 900$ N), an Steg 1 angreifend

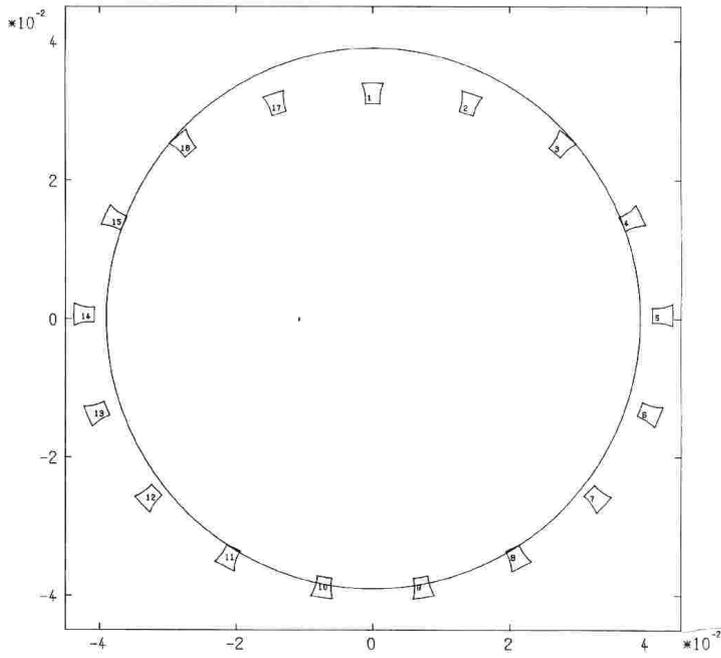


Bild 43: Radialkraft ($F=-900$ N), an Steg 1 angreifend

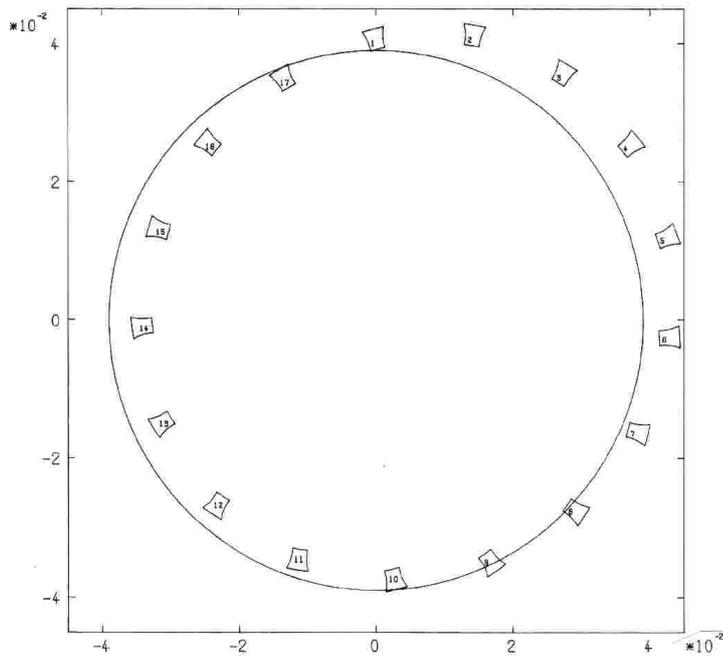


Bild 44: Tangentialkraft ($F= 900$ N), an Steg 1 angreifend

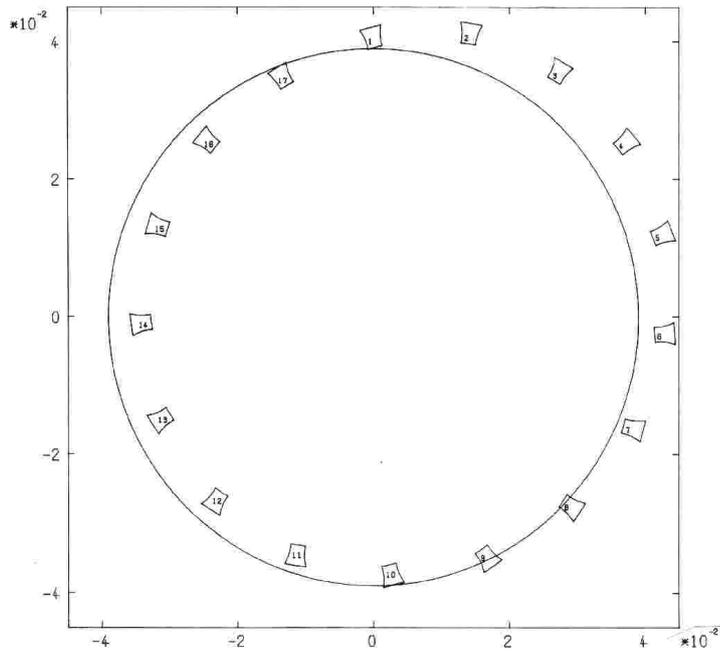


Bild 45: Moment ($M=9 \text{ Nm}$), an Steg 1 angreifend

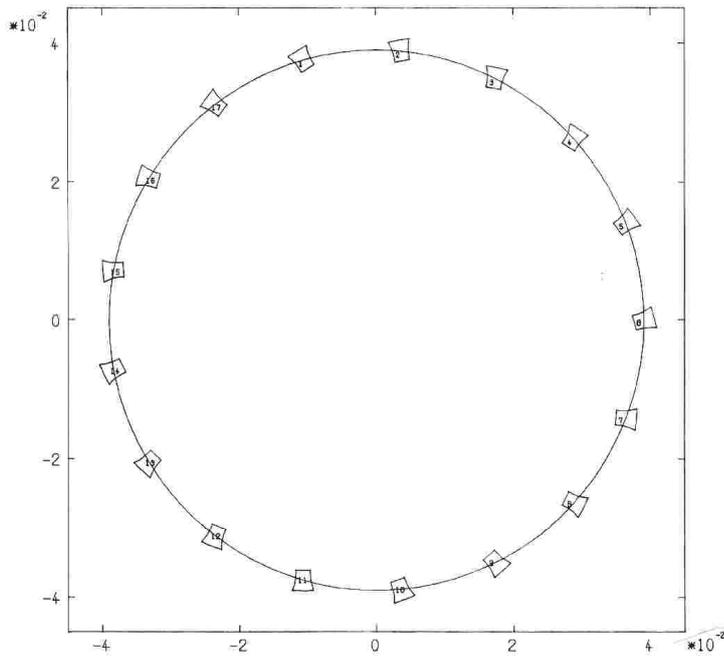


Bild 46: Momente ($M_i=1 \text{ Nm}$), an den Stegen 1 bis 17 angreifend

7 Schmierspaltkräfte

Die in den Bewegungsgleichungen (55) bis (65) auftretenden äußeren Kräfte und Momente entstehen in den Kontaktstellen zwischen Wälzkörpern, Laufbahnen und Käfig. Gupta [9] verwendet zur Bestimmung der über das Schmiermittel übertragenen Kräfte an Scheibenprüfständen gewonnene Meßergebnisse, deren Gültigkeit aber nur innerhalb des von ihm untersuchten Bereichs gesichert ist. Um diese Einschränkung zu vermeiden, wird in der vorliegenden Arbeit die instationäre, elastohydrodynamische Schmiertheorie (EHD) nach Potthoff [2] angewendet, die zusätzlich die Verdrängungsströmung im Spalt berücksichtigt.

7.1 Instationäre elastohydrodynamische Schmiertheorie

Der Druck im Schmierspalt ruft Normal- und Tangentialspannungen hervor, aus denen man durch Integration die dort wirkenden Druck- und Reibkräfte erhält. Die erste Bedingung für den Druckverlauf folgt aus der Reynoldsgleichung mit den Annahmen

- Zähigkeit des Fluids unabhängig vom Schergefälle
(Newton'sches Fluid)
- Trägheitskräfte gegenüber Druck- und Reibkräften
vernachlässigbar
- Seitenfluß vernachlässigbar
- Zähigkeit und Dichte des Fluids über der Spalthöhe konstant
- Druck über der Spalthöhe konstant

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho(x) \cdot h^3(x)}{12 \cdot \eta(x)} \cdot \frac{\partial p(x)}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \rho(x) \cdot h(x) \frac{u_1 + u_2}{2} + \rho(x) \cdot v_m \quad (172)$$

Darin bedeuten

- ρ Dichte des Schmiermittels
- η kinematische Viskosität des Schmiermittels
- p Druck
- h Spalthöhe
- u_1, u_2 Umfangsgeschwindigkeit der Spaltgrenzen
- v_m Annäherungsgeschwindigkeit der Spaltgrenzen

Die zweite Bedingung folgt aus den elastischen Verformungen der Spaltkontur, die sich aus Einflußzahlen auf der Basis von Finite-Elemente-Rechnungen ergeben. Dazu idealisiert man nach [2] die Spaltgrenzen durch

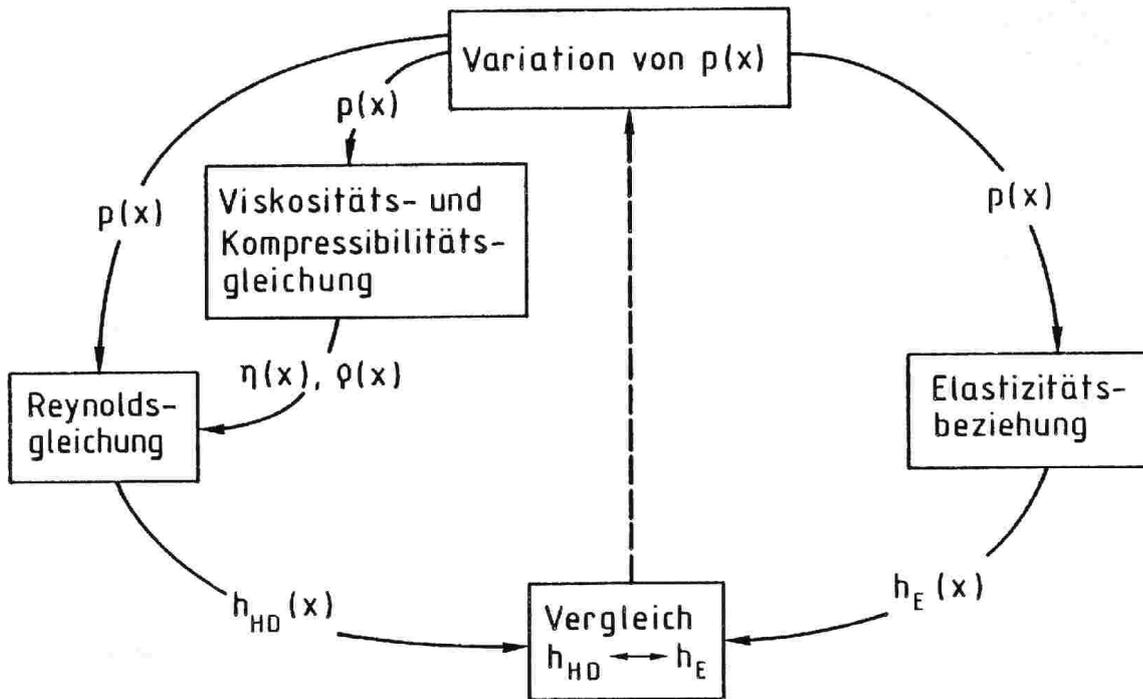


Bild 47: Ablauf der Schmierspaltrechnung nach Potthoff [2]

Zylinder und Quader. Bei genügend feiner Diskretisierung lassen sich allgemeingültige Einflußzahlen gewinnen, die durch geeignete Überlagerung die Verformung des Schmierspaltel liefern.

Bild 47 verdeutlicht den Ablauf der gesamten Rechnung. Für äquidistant auf der x-Achse im Schmierspalt angeordnete Stützstellen variiert man den Druck und berechnet getrennt mit der Reynoldsgleichung und der Elastizitätsbeziehung den Spaltverlauf. Stimmen beide Spaltgeometrien überein, so liegt eine Lösung vor, anderenfalls setzt man die Variation des Druckverlaufes fort.

7.2 Näherungsgleichungen

Wegen des erheblichen Aufwandes für eine einzige Schmierspaltrechnung kommt das oben beschriebene Verfahren innerhalb der Lager-Simulationsrechnung nicht zur Anwendung. Bei Lagern mit n_w Wälzkörpern sind z.B. $16 \cdot n_w$ Schmierspaltel pro Zeitschritt zu berechnen. Bei einigen tausend Zeitschritten pro Rechenlauf würde das exakte Verfahren zu unerträglich hohen Rechenzeiten führen. Potthoff stellte deshalb Näherungsgleichungen für das FVA ¹⁾ - Referenzöl Nr.3 bei 70° C auf, die

¹⁾ Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt

über einen großen Parameterbereich die exakten Lösungen gut wiedergeben.

Die Druck- und Reibkräfte im Schmierpalt hängen dann nur noch von vier Kenngrößen ab und zwar

- der nominellen Schmierpaltheöhe h_{nom}
- der Annäherungsgeschwindigkeit v_m
- den Umfangsgeschwindigkeiten u_1, u_2 .

Die nominelle Schmierpaltheöhe ist eine theoretische Größe in der Simulationsrechnung, die von unverformten Körpern ausgeht und deshalb in EHD-Kontakten negative Werte annehmen kann. Dies berücksichtigen die Näherungsgleichungen, indem sie aus h_{nom} und v_m die minimale Schmierpaltheöhe h_0 bilden und für die Berechnung der Schmierpalte verwenden.

Die Simulationsrechnung ermittelt also abhängig von Lagergeometrie und -kinematik ständig die Kenngrößen in den EHD-Kontakten und stellt sie den Näherungsgleichungen für die Bestimmung der Schmierpaltkräfte, die ihrerseits wieder in die Bewegungsgleichungen eingehen, zur Verfügung.

7.3 Kenngrößen in den Schmierpalten

Die folgenden Abschnitte enthalten die Herleitungen der Kenngrößen in den einzelnen EHD-Kontakten unter Berücksichtigung der Lagergeometrie und -kinematik. Dabei wird der Übersichtlichkeit wegen eine vektorielle Betrachtungsweise gewählt. Als Bezugssystem dient das geführte Koordinatensystem nach Abschnitt 4.2. Der Ortsvektor

$$\overrightarrow{O_L P} = \vec{r} = \begin{pmatrix} r \sin \beta \\ r \cos \beta \end{pmatrix} \quad (173)$$

definiert dann die Lage eines beliebigen Punktes P , während die zeitliche Ableitung

$$\overset{\circ}{\overrightarrow{O_L P}} = \dot{\vec{r}} = \begin{pmatrix} \dot{r} \sin \beta + r \dot{\beta} \cos \beta \\ \dot{r} \cos \beta - r \dot{\beta} \sin \beta \end{pmatrix} \quad (174)$$

die Geschwindigkeit von P gegenüber dem Lagermittelpunkt O_L angibt. Außerdem gelten die Bezeichnungen

$$(\overrightarrow{O_L P})_x = (\vec{r})_x = r \sin \beta \quad (175)$$

$$(\overrightarrow{O_L P})_y = (\vec{r})_y = r \cos \beta \quad (176)$$

Dabei dienen die Indizes x und y zur Kennzeichnung der x - bzw. y -Komponente des Vektors. Die skalare Größe

$$|\overrightarrow{O_L\dot{P}}| = \sqrt{(\overrightarrow{O_L\dot{P}})_x^2 + (\overrightarrow{O_L\dot{P}})_y^2} \quad (177)$$

gibt die Länge des Vektors $\overrightarrow{O_L\dot{P}}$ und

$$|\overrightarrow{O_L\dot{P}}|^\circ = \frac{(\overrightarrow{O_L\dot{P}})_x \cdot (\overrightarrow{O_L\dot{P}})_x + (\overrightarrow{O_L\dot{P}})_y \cdot (\overrightarrow{O_L\dot{P}})_y}{|\overrightarrow{O_L\dot{P}}|} \quad (178)$$

die Geschwindigkeit, mit der sich P von O_L entfernt (Abstandsänderung), an.

Vorgegebene, während der Simulationsrechnung nicht veränderte Größen erhalten zu besserer Übersicht einen Stern (\star).

7.3.1 Wälzkörper-Innenring. *Bild 48* zeigt die Geometrie im Schmierpalt zwischen Wälzkörper und Innenring. Die nominelle Schmierpalthöhe h_{nom} erhält man aus der Beziehung

$$h_{nom} = |\overrightarrow{O_I\dot{M}_w}| - r_w^\star \quad (179)$$

Der Vektor $\overrightarrow{O_I\dot{M}_w}$ ergibt sich aus der Vektorgleichung

$$\overrightarrow{O_I\dot{M}_w} = \vec{r}_j - \vec{e}_i^\star = r_j \begin{pmatrix} \sin \beta_j \\ \cos \beta_j \end{pmatrix} - r_i^\star \begin{pmatrix} \sin \beta_{ei}^\star \\ \cos \beta_{ei}^\star \end{pmatrix} \quad (180)$$

Die Annäherungsgeschwindigkeit v_m entspricht der Abstandsänderung der Punkte O_I und M_w (s.a. Gleichung 7.7) :

$$v_m = |\overrightarrow{O_I\dot{M}_w}|^\circ \quad (181)$$

Das lokale u_{ij} , y_{ij} -Koordinatensystem liegt immer in der engsten Stelle zwischen dem Innenring und dem Wälzkörper j , d.h. es wandert mit dem Punkt A entlang des Innenringes. Der zugehörige Ortsvektor lautet

$$\overrightarrow{O_L\dot{A}} = \vec{e}_i^\star + r_i^\star \cdot \frac{\overrightarrow{O_I\dot{M}_w}}{|\overrightarrow{O_I\dot{M}_w}|} \quad (182)$$

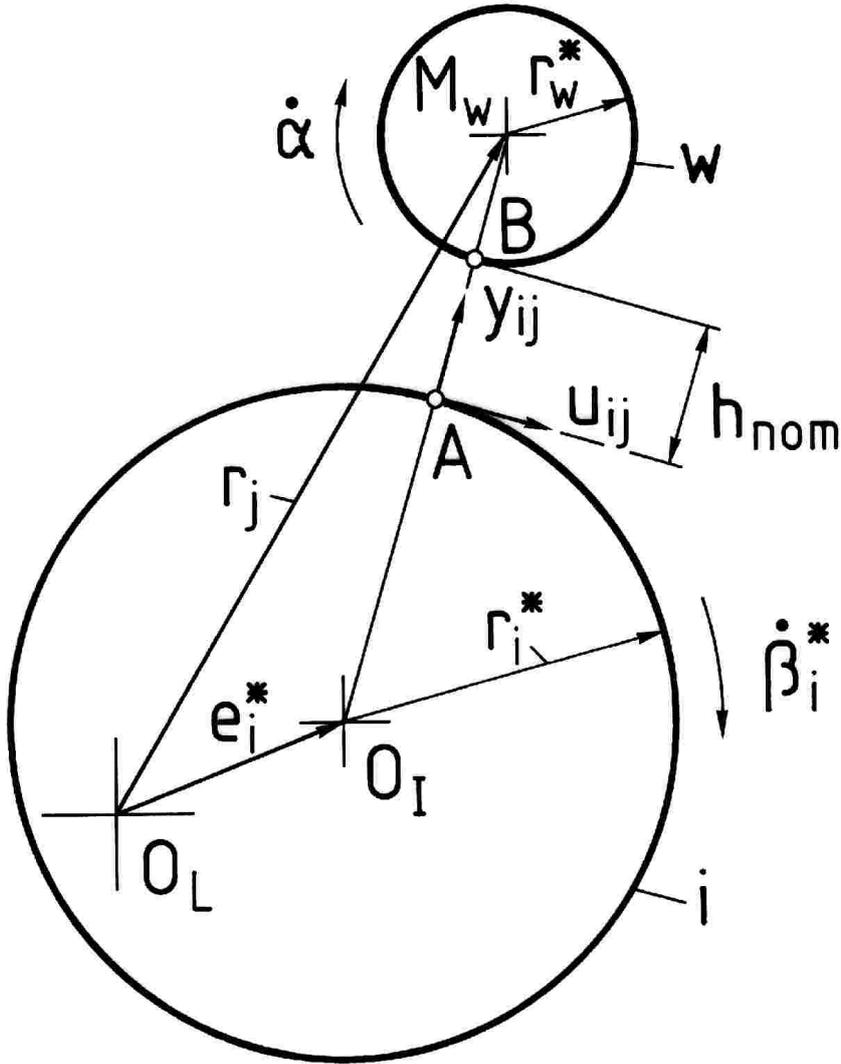


Bild 48: Schmierspalt Wälzkörper-Innenring

während

$$\overset{\circ}{\overrightarrow{O_L A}} = r_i^* \left(\frac{\overrightarrow{O_I M_w}}{|\overrightarrow{O_I M_w}|} \right)^\circ \quad (183)$$

die Geschwindigkeit des Punktes A gegenüber dem (stillstehenden) Innenring angibt. Die entsprechenden Vektoren für den gegenüberliegenden Punkt B, der an dem Wälzkörper entlangwandert, sind

$$\overrightarrow{O_L B} = \vec{r}_j - r_w^* \cdot \frac{\overrightarrow{O_I M_w}}{|\overrightarrow{O_I M_w}|} \quad (184)$$

$$\overset{\circ}{\overrightarrow{O_L B}} = \dot{\vec{r}}_j - r_w^* \cdot \left(\frac{\overrightarrow{O_I M_w}}{|\overrightarrow{O_I M_w}|} \right)^\circ \quad (185)$$

Der Ausdruck

$$\left(\frac{\overrightarrow{O_I \dot{M}_w}}{|\overrightarrow{O_I \dot{M}_w}|} \right)^\circ = \frac{1}{|\overrightarrow{O_I \dot{M}_w}|} \overset{\circ}{\overrightarrow{O_I \dot{M}_w}} - \frac{|\overrightarrow{O_I \dot{M}_w}|^\circ}{|\overrightarrow{O_I \dot{M}_w}|^2} \overrightarrow{O_I \dot{M}_w} \quad (186)$$

läßt sich deuten als Winkelgeschwindigkeit, mit der das lokale Koordinatensystem um den Punkt O_I kreist. Die Projektion der Geschwindigkeit von A auf den Einheitsvektor \vec{u}_{ij} in Richtung der u_{ij} -Achse des lokalen Koordinatensystems zuzüglich der Umfangsgeschwindigkeit des drehenden Innenringes ergibt die Kenngröße

$$u_1 = \overset{\circ}{\overrightarrow{O_L \dot{A}}} \cdot \vec{u}_{ij} + r_i^* \dot{\beta}_i^* \quad (187)$$

Analog erhält man

$$u_2 = \overset{\circ}{\overrightarrow{O_L \dot{B}}} \cdot \vec{u}_{ij} - r_w^* \dot{\alpha}_j \quad (188)$$

Der Vektor \vec{u}_{ij} steht senkrecht auf $\overrightarrow{O_I \dot{M}_w}$. Daher gilt

$$\vec{u}_{ij} = \frac{1}{|\overrightarrow{O_I \dot{M}_w}|} \cdot \begin{pmatrix} +(\overrightarrow{O_I \dot{M}_w})_y \\ -(\overrightarrow{O_I \dot{M}_w})_x \end{pmatrix} \quad (189)$$

Aus den Kenngrößen h_{nom} , v_m , u_1 und u_2 bestimmen die EHD-Näherungsgleichungen die Druckkraft F_{yij} und die Reibkraft F_{uij} im Schmierpalt. Die Komponenten dieser Kräfte in r - und β -Richtung gehen als äußere Kräfte in die Bewegungsgleichungen (55) und (57) ein. Rechnerisch geschieht dies durch Projektion von \vec{F}_{yij} und \vec{F}_{uij} auf die Einheitsvektoren in r - und β -Richtung.

Die Reibkraft ruft zusätzlich ein Moment

$$M_{ij} = -r_w^* F_{uij} \quad (190)$$

um die Wälzkörper-Hauptachse hervor, das als äußeres Moment in die Bewegungsgleichung (59) eingeht.

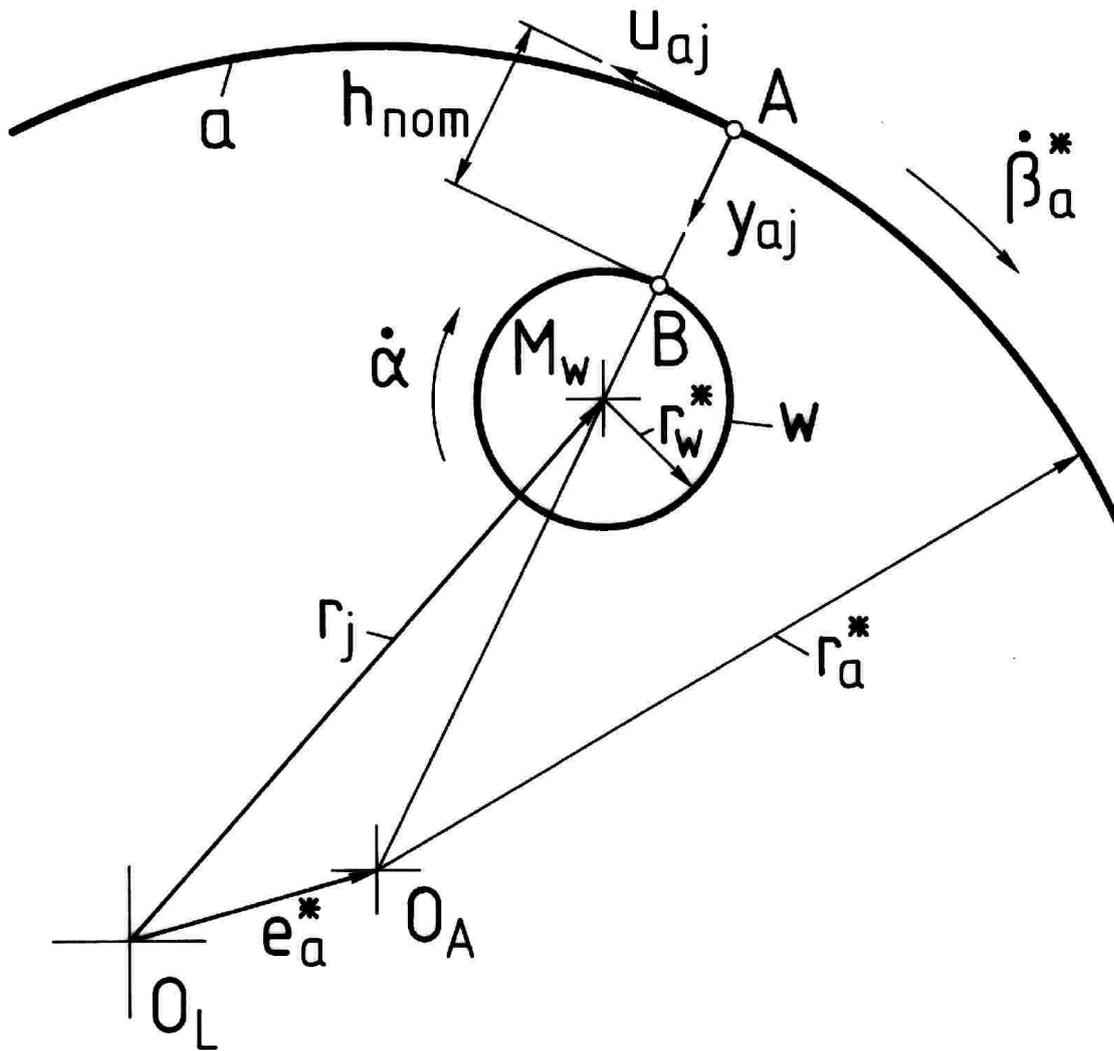


Bild 49: Schmierspalt Wälzkörper-Außenring

7.3.2 Wälzkörper-Außenring. Bild 49 gibt den geometrischen Zusammenhang zwischen Wälzkörper und Außenring wieder. Für h_{nom} folgt sofort

$$h_{nom} = r_a^* - r_w^* - |\overrightarrow{O_A M_w}| \quad (191)$$

mit

$$\overrightarrow{O_A M_w} = \vec{r}_j - \vec{e}_a^* = r_j \begin{pmatrix} \sin \beta_j \\ \cos \beta_j \end{pmatrix} - r_a^* \begin{pmatrix} \sin \beta_{ea}^* \\ \cos \beta_{ea}^* \end{pmatrix} \quad (192)$$

Die Annäherungsgeschwindigkeit v_m der Punkte A und B entspricht der Änderung des Abstandes zwischen O_A und M_w

$$v_m = -|\overrightarrow{O_A M_w}|^\circ \quad (193)$$

Die Umfangsgeschwindigkeiten erhält man wie in Abschnitt 7.3.1 durch Projektion der Geschwindigkeiten von A und B in u_{aj} -Richtung und unter der Berücksichtigung der Rotation von Aussenring und Wälzkörper

$$u_1 = \overrightarrow{O_L \overset{\circ}{A}} \cdot \vec{u}_{aj} - r_a^* \dot{\beta}_a^* \quad (194)$$

$$u_2 = \overrightarrow{O_L \overset{\circ}{B}} \cdot \vec{u}_{aj} - r_w^* \dot{\alpha}_j \quad (195)$$

Der Ortsvektor von A beträgt nach *Bild 49*

$$\overrightarrow{O_L \overset{\circ}{A}} = \vec{e}_a^* + r_a^* \cdot \frac{\overrightarrow{O_A \overset{\circ}{M}_w}}{|\overrightarrow{O_A \overset{\circ}{M}_w}|} \quad (196)$$

Die Differentiation nach der Zeit führt auf die Geschwindigkeit

$$\overrightarrow{O_L \overset{\circ}{A}} = r_a^* \left(\frac{\overrightarrow{O_A \overset{\circ}{M}_w}}{|\overrightarrow{O_A \overset{\circ}{M}_w}|} \right)^\circ \quad (197)$$

mit

$$\left(\frac{\overrightarrow{O_A \overset{\circ}{M}_w}}{|\overrightarrow{O_A \overset{\circ}{M}_w}|} \right)^\circ = \frac{1}{|\overrightarrow{O_A \overset{\circ}{M}_w}|} \cdot \overrightarrow{O_A \overset{\circ}{M}_w} - \frac{|\overrightarrow{O_A \overset{\circ}{M}_w}|^\circ}{|\overrightarrow{O_A \overset{\circ}{M}_w}|^2} \cdot \overrightarrow{O_A \overset{\circ}{M}_w} \quad (198)$$

Entsprechend gilt für den Punkt B

$$\overrightarrow{O_L \overset{\circ}{B}} = \dot{r}_j + r_w^* \cdot \left(\frac{\overrightarrow{O_A \overset{\circ}{M}_w}}{|\overrightarrow{O_A \overset{\circ}{M}_w}|} \right)^\circ \quad (199)$$

Die für die Bewegungsgleichungen (55), (57) und (59) notwendigen äußeren Kräfte und Momente erhält man - wie in Abschnitt 7.3.1 für den Innenring gezeigt - durch Projektion der aus den Näherungsgleichungen bestimmten Druckkraft F_{yaj} und Reibkraft F_{uaj}

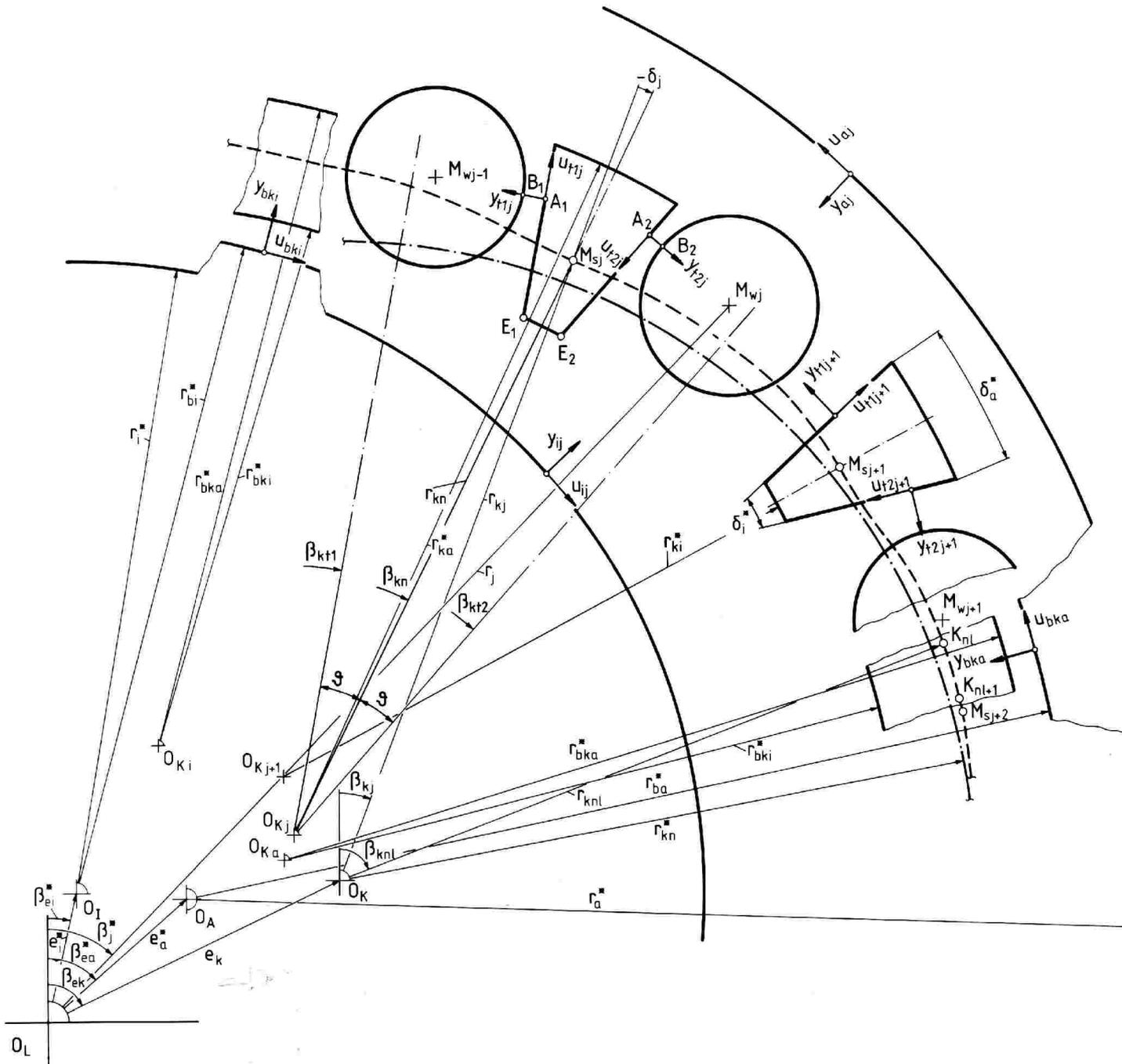


Bild 50: Schmierspalte Wälzkörper - Käfig (gerade Taschenkontur)

7.3.3 Wälzkörper-Käfig, gerade Taschenkontur.

Bild 50 zeigt einen Ausschnitt aus einem Lager mit bordgeführten Käfig und gerader Taschenkontur. Die Stegbegrenzungen laufen dabei parallel zum Radialstrahl der Taschenmitte. Der folgende Abschnitt stellt die Kenngrößen für die Schmierspalte zwischen den Käfigstegen und den Wälzkörpern vor. Die rechnerische Vorgehensweise besteht in der Betrachtung

jedes einzelnen Käfigsteges und der benachbarten Wälzkörper sowie einer anschließenden Summation aller an dem Käfig angreifenden Kräfte und Momente.

Die nominelle Schmierspalthöhe h_{nom} läßt sich aus *Bild 50* ablesen

$$h_{nom} = |\overrightarrow{M_{w\ j-1} \dot{A}_1}| - r_w^* \quad (200)$$

für den Schmierspalt zwischen dem Wälzkörper $j - 1$ und dem Steg j . Analog gilt für den Wälzkörper j

$$h_{nom} = |\overrightarrow{M_{wj} \dot{A}_2}| - r_w^* \quad (201)$$

Im folgenden bezeichnet der Einfachheit halber der Index 1 den Schmierspalt auf der linken Stegseite und der Index 2 den auf der rechten. Dann ersetzt

$$h_{nom1,2} = |\overrightarrow{M_{wj-1,j} \dot{A}_{1,2}}| - r_w^* \quad (202)$$

die Gleichungen (200) und (201). Für den Vektor $\overrightarrow{M_{wj-1,j} \dot{A}_{1,2}}$ folgt

$$\overrightarrow{M_{wj-1,j} \dot{A}_{1,2}} = \overrightarrow{E_{1,2} \dot{A}_{1,2}} - \overrightarrow{E_{1,2} \dot{M}_{wj-1,j}} \quad (203)$$

mit

$$\overrightarrow{E_{1,2} \dot{M}_{wj-1,j}} = \overrightarrow{O_L \dot{M}_{wj-1,j}} - \overrightarrow{O_K \dot{E}_{1,2}} - \overrightarrow{O_K \dot{O}_{kj}} - \vec{e}_k \quad (204)$$

$$\overrightarrow{O_K \dot{E}_{1,2}} = r_{ki}^* \begin{pmatrix} \sin(\beta_{kn} \mp \delta_i/2) \\ \cos(\beta_{kn} \mp \delta_i/2) \end{pmatrix} \quad (205)$$

$$\overrightarrow{O_K \dot{O}_{kj}} = r_{kj} \begin{pmatrix} \sin \beta_{kj} \\ \cos \beta_{kj} \end{pmatrix} - r_{kn}^* \begin{pmatrix} \sin(\beta_{kj} - \delta_j) \\ \cos(\beta_{kj} - \delta_j) \end{pmatrix} \quad (206)$$

$$\beta_{kt1,2} = \beta_{kj} - \delta_j \mp \vartheta = \beta_{kj} - \delta_j \mp \frac{\pi}{n_w} \quad (207)$$

und

$$\overrightarrow{E_{1,2} \dot{A}_{1,2}} = \overrightarrow{E_{1,2} \dot{M}_{wj-1,j}} \cdot \begin{pmatrix} \sin \beta_{kt1,2} \\ \cos \beta_{kt1,2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sin \beta_{kt1,2} \\ \cos \beta_{kt1,2} \end{pmatrix} \quad (208)$$

als Projektion von $\overrightarrow{E_{1,2} \dot{M}_{wj-1,j}}$ in Richtung des Radialstrahls. Wegen der elastischen Verdrehung der Käfigstege berücksichtigt Gleichung (206) für

jeden Steg j einen Krümmungsmittelpunkt O_{Kj} im Gegensatz zu dem Mittelpunkt O_K des unverformten Käfigs.

Die Annäherungsgeschwindigkeit der Spaltgrenzen entspricht der Abstandsänderung der Punkte $A_{1,2}$ und $M_{wj-1,j}$:

$$v_{m1,2} = -|\overrightarrow{M_{wj-1,j}A_{1,2}}|^\circ \quad (209)$$

Die Umfangsgeschwindigkeiten ergeben sich aus der Projektion der Geschwindigkeiten $\overrightarrow{O_L A_{1,2}}$ bzw. $\overrightarrow{O_L B_{1,2}}$ auf die u_{tj} -Richtung des lokalen Koordinatensystems. Es gelten im einzelnen

$$u_{11,2} = \overrightarrow{O_L A_{1,2}} \cdot \vec{u}_{tj1,2} \quad (210)$$

$$u_{21,2} = \overrightarrow{O_L B_{1,2}} \cdot \vec{u}_{tj1,2} - r_w^* \dot{\alpha}_{j-1,j} \quad (211)$$

Mit der y_{tj} -Richtung

$$\vec{y}_{tj1,2} = \frac{1}{|\overrightarrow{M_{wj-1,j}A_{1,2}}|} \cdot \overrightarrow{M_{wj-1,j}A_{1,2}} \quad (212)$$

erhält man sofort

$$\vec{u}_{tj1,2} = \begin{pmatrix} +(\vec{y}_{tj1,2})_x \\ -(\vec{y}_{tj1,2})_x \end{pmatrix} \quad (213)$$

Die Differentiation der Ortsvektoren $\overrightarrow{O_L A_{1,2}}$ nach der Zeit führt auf die Geschwindigkeiten der Punkte $A_{1,2}$ gegenüber dem Lagermittelpunkt:

$$\overrightarrow{O_L A_{1,2}}^\circ = \dot{e}_k + \overrightarrow{O_K O_{Kj}}^\circ + \overrightarrow{O_K E_{1,2}}^\circ + \overrightarrow{E_{1,2} A_{1,2}}^\circ \quad (214)$$

Wegen der geraden Stegkontur gilt bei reiner Translation für die Geschwindigkeiten der Punkte $B_{1,2}$

$$\overrightarrow{O_L B_{1,2}}^\circ = \overrightarrow{O_L M_{wj-1,j}}^\circ = \dot{r}_{j-1,j} \quad (215)$$

Die Kenngrößen $h_{nom1,2}$, $v_{m1,2}$, $u_{11,2}$ und $u_{21,2}$ liefern mit den EHD-Näherungsgleichungen die Druckkräfte $F_{ytj1,2}$ und $F_{utj1,2}$ zwischen dem Käfigsteg j und den benachbarten Wälzkörpern. Die äußeren Kräfte und Momente für die Bewegungsgleichungen der Wälzkörper (55), (57) und (59) erhält man wie in Abschnitt 7.3.1 beschrieben. Die auf die Käfigstege in e_k - und β_{ek} -Richtung wirkenden Kräfte gehen in die Bewegungsgleichungen (60) und (62) ein. Für das äußere Drehmoment in Gleichung (64) sowie für die Verformungsrechnung des Käfigs benötigt man zusätzlich die Komponenten in radialer und tangentialer Richtung. Dies geschieht rechnerisch durch Projektion der Schmierspaltkräfte $F_{ytj1,2}$ und $F_{utj1,2}$ auf die Einheitsvektoren der betreffenden Richtung.

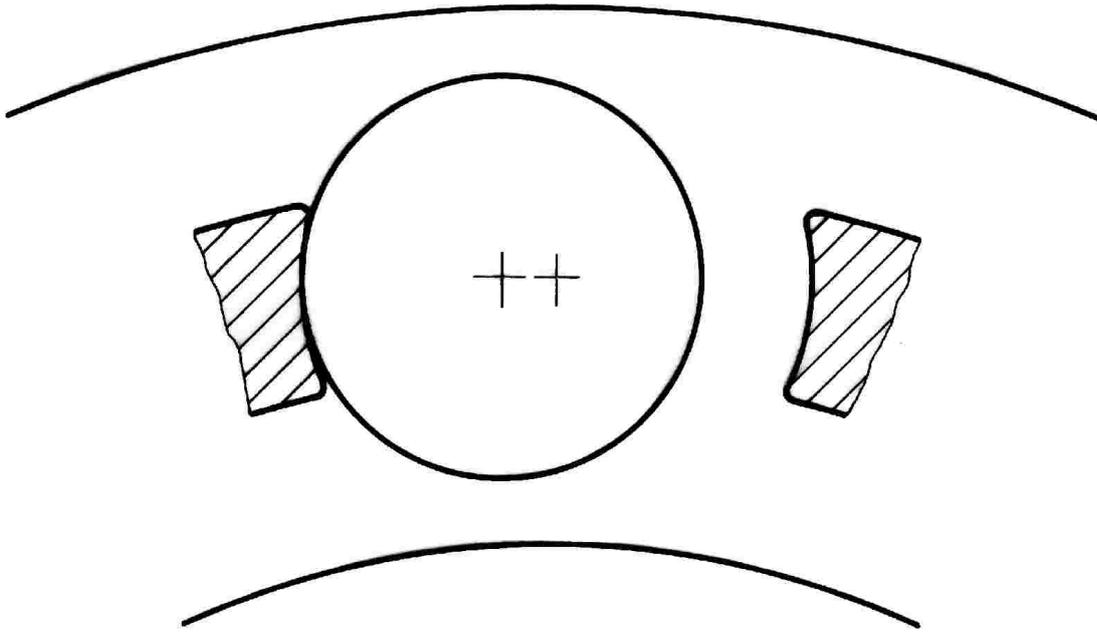


Bild 51: "Taschenlage"

7.3.4 Wälzkörper-Käfig, kreisförmige Taschenkontur.

Kreisförmige Käfigtaschen erlauben die Führung des Käfigs in radialer Richtung durch die Wälzkörper. Dabei treten zwei grundsätzlich unterschiedliche Möglichkeiten der Schmierfilmbildung auf. Berühren sich Käfig und Wälzkörper innerhalb des konkaven Teiles der Tasche, so spricht man von "Taschenlage" (Bild 51). Dagegen sei der Zustand, bei dem der Wälzkörper sich an der Stegecke abstützt, im folgenden mit "Kippen" bezeichnet (Bild 52). Für das Auftreten einer Taschenlage lassen sich mathematisch zwei Bedingungen formulieren. Zunächst muß die Projektion p des Vektors $\overrightarrow{M_{t1,2j}M_{wj-1,j}}$ auf die positive β -Richtung

$$p_{1,2} = \overrightarrow{M_{t1,2j}M_{wj-1,j}} \cdot \vec{e}_\beta \quad (216)$$

nach Bild 53 auf der linken Stegseite ein positives und auf der rechten ein negatives Vorzeichen haben, d.h. der Wälzkörpermittelpunkt muß innerhalb der betrachteten Taschenhälften liegen. Befindet sich der Wälzkörper außerhalb, so bildet sich der engste Schmierpalt an der inneren oder äußeren Stegecke aus (Kippen). Die zweite Bedingung fordert, daß der Berührungspunkt zwischen Käfig und Wälzkörper auch auf der tatsächlich vorhandenen Stegkontur liegt. Dazu muß der Vektor \vec{r}_b in Bild 53 be-

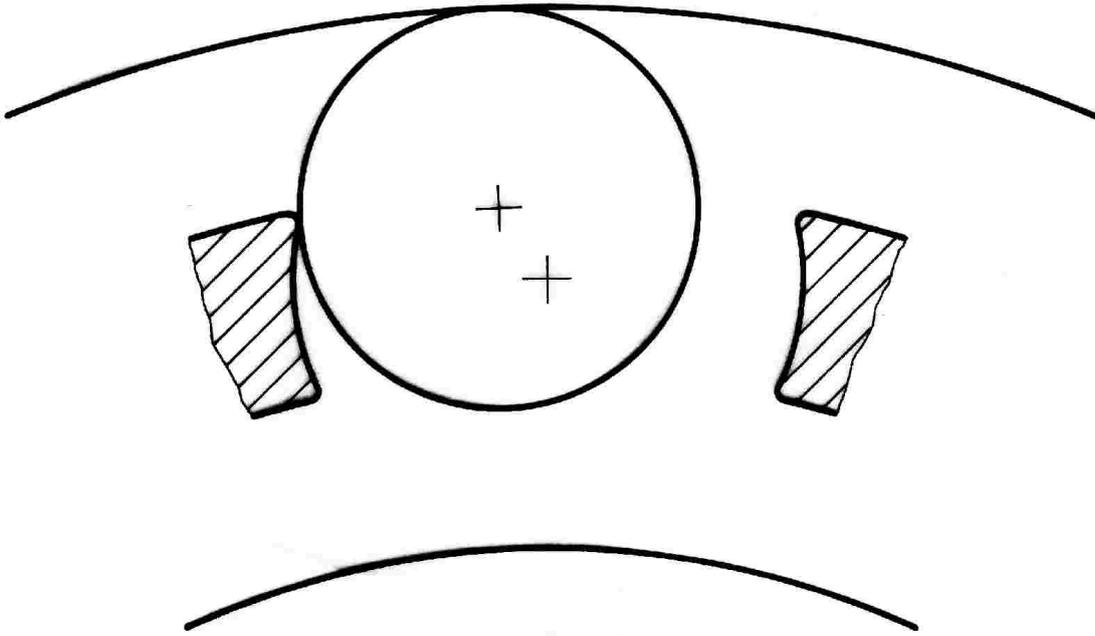


Bild 52: "Kippen"

tragsmäßig zwischen r_{ki}^* und r_{ka}^* liegen

$$r_{ki}^* < |\vec{r}_b| < r_{ka}^* \quad (217)$$

Mit dem Cosinussatz folgt sofort

$$|\vec{r}_b| = \sqrt{r_{kt1,2}^{*2} + r_t^{*2} + 2r_{kt1,2}^* r_t^* \cos(\beta_{kt1,2} - \varphi_{1,2})} \quad (218)$$

In allen anderen Fällen liegt "Kippen" nach Bild 52 vor.

Bild 54 legt die wichtigsten für die Berechnung der Schmierspaltkennwerte notwendigen Geometriegrößen fest. Bei den zwei Kontaktstellen zwischen Käfig und Wälzkörper j handelt es sich auf der linken Seite (Steg j) um Taschenlage und auf der rechten (Steg $j + 1$) um Kippen des Wälzkörpers.

Bei Taschenlage folgt mit Bild 54 für den Steg j sofort die nominellen Schmierspalthöhen

$$h_{nom1,2} = r_{kt}^* - r_w^* - |\overrightarrow{M_{t1,2j} \vec{M}_{wj-1,j}}| \quad (219)$$

Die Verlagerungsvektoren $\overrightarrow{M_{t1,2j} \vec{M}_{wj-1,j}}$ erhält man aus der Vektorgleichung

$$\vec{r}_{j-1,j} = \vec{r}_{t01,2j} + \overrightarrow{M_{t1,2j} \vec{M}_{wj-1,j}} \quad (220)$$

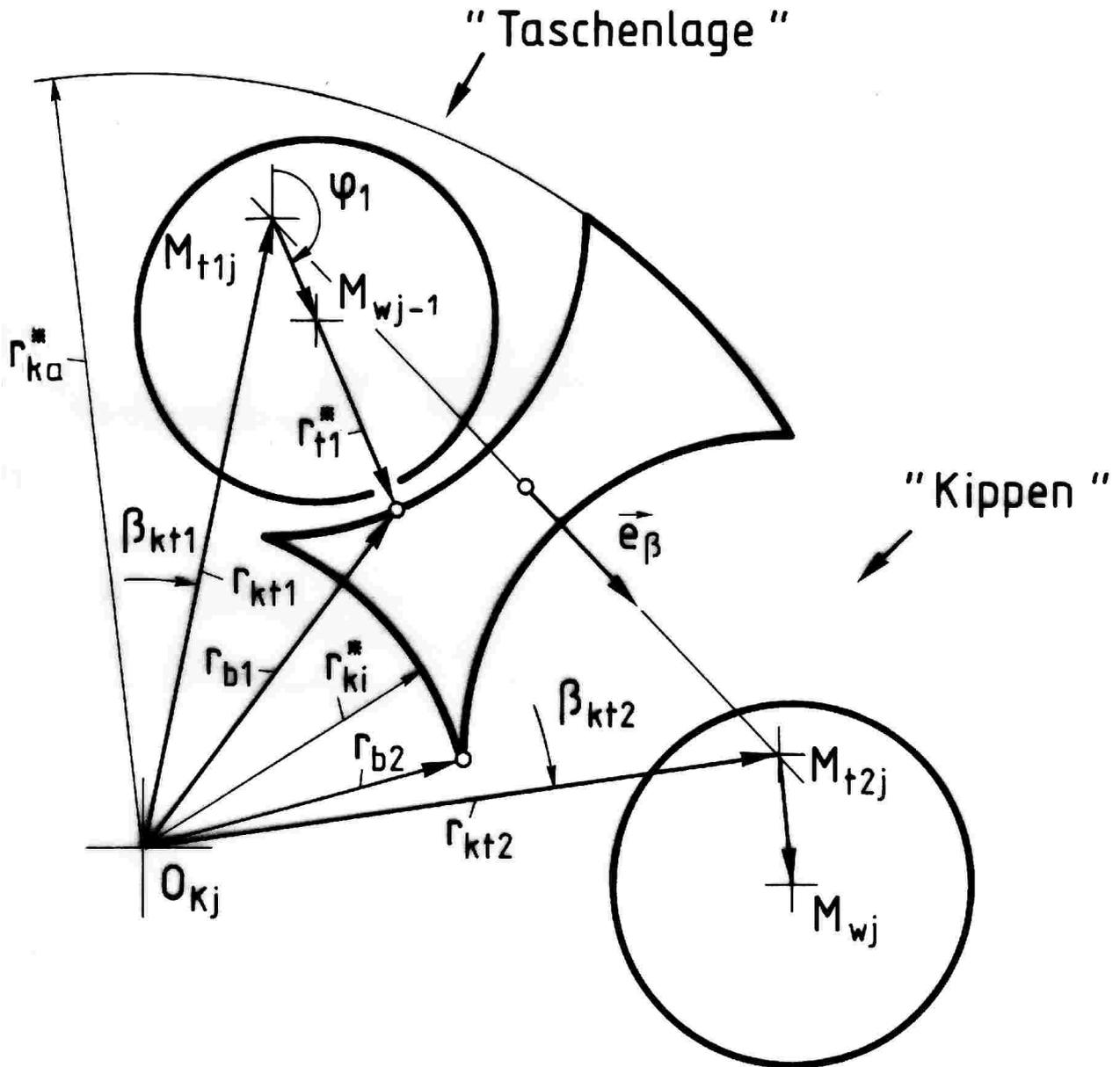


Bild 53: Bestimmung von Taschenlage und Kippen

mit

$$\vec{r}_{t01,2j} = \vec{e}_k + \overrightarrow{O_K \dot{O}_{Kj}} + \vec{r}_{kt1,2} \quad (221)$$

$$\vec{r}_{kt1,2} = r_{kt}^* \begin{pmatrix} \sin(\beta_{kj} - \delta_j \mp \vartheta) \\ \cos(\beta_{kj} - \delta_j \mp \vartheta) \end{pmatrix} \quad (222)$$

und $\overrightarrow{O_K \dot{O}_{Kj}}$ nach Gleichung (206).

Die Annäherungsgeschwindigkeiten der Spaltgrenzen entsprechen den Abstandsänderungen zwischen den Punkten

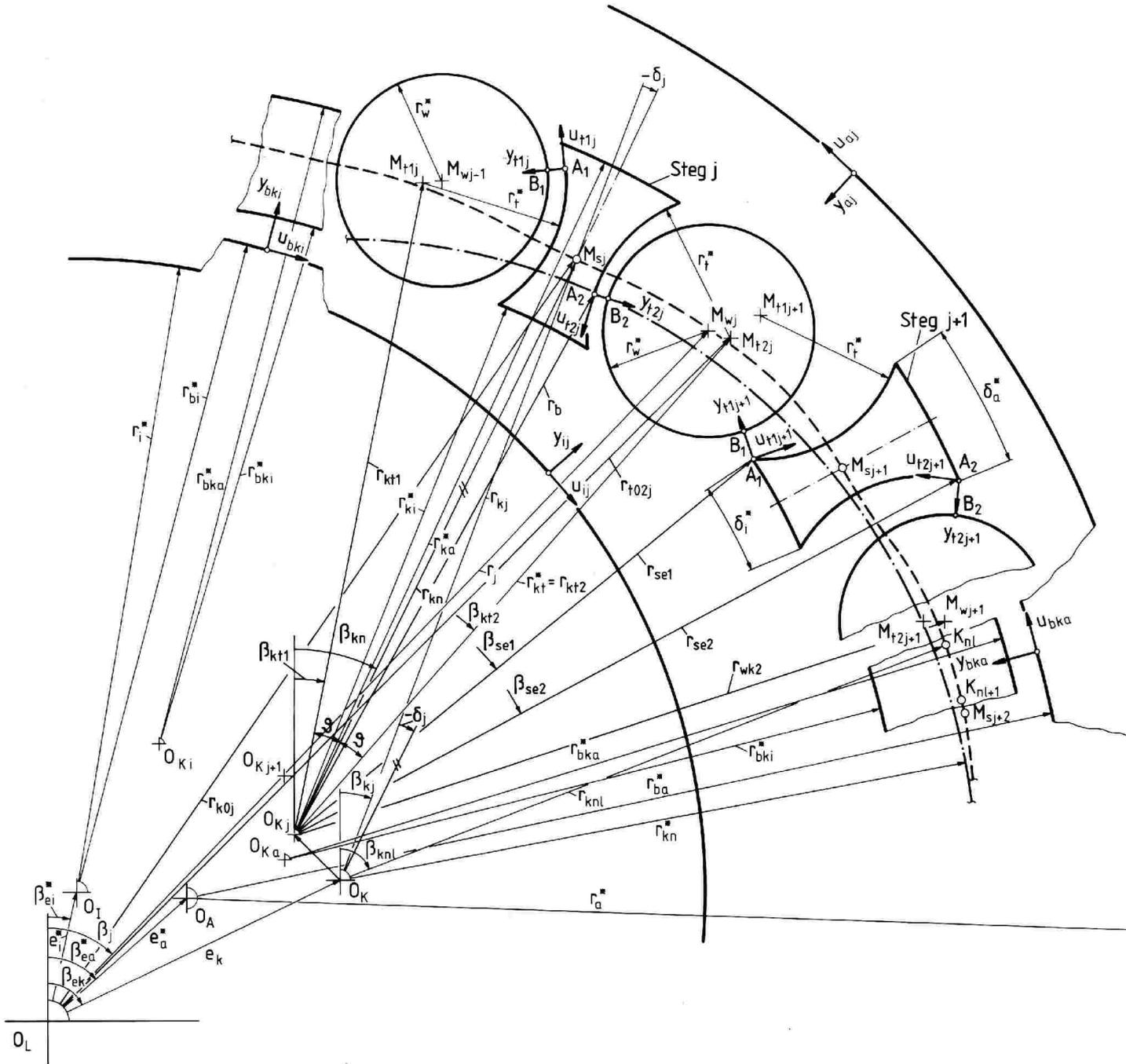


Bild 54: Schmierspalte Wälzkörper-Käfig (kreisförmige Taschenkontur)

$M_{t1,2j}$ und $M_{wj-1,j}$:

$$v_{m1,2} = -|\overrightarrow{M_{t1,2j} M_{wj-1,j}}|^\circ \quad (223)$$

Die Auswertung von (223) erfolgt mit den Gleichungen (177) und (178).

Die Projektion der Geschwindigkeiten der Punkte $A_{1,2}$ in u -Richtung der lokalen Koordinatensysteme führt auf die Umfangsgeschwindigkeiten $u_{11,2}$.

Mit den Einheitsvektoren

$$\vec{y}_{tj1,2} = - \frac{\overrightarrow{M_{t1,2j} \dot{M}_{wj-1,j}}}{|\overrightarrow{M_{t1,2j} \dot{M}_{wj-1,j}}|} \quad (224)$$

$$\vec{u}_{tj1,2} = \begin{pmatrix} + (\vec{y}_{t1,2j})_y \\ - (\vec{y}_{t1,2j})_x \end{pmatrix} \quad (225)$$

folgt die Kenngröße

$$u_{11,2} = \overrightarrow{O_L \overset{\circ}{A}_{1,2}} \cdot \vec{u}_{tj1,2} \quad (226)$$

Die Vektorgleichung

$$\vec{r}_{t01,2j} = \overrightarrow{O_L \overset{\circ}{A}_{1,2}} + r_t^* \cdot \vec{y}_{tj1,2} \quad (227)$$

führt auf die Geschwindigkeiten von $A_{1,2}$

$$\overrightarrow{O_L \overset{\circ}{A}_{1,2}} = \dot{\vec{r}}_{t01,2j} - r_t^* \cdot \dot{\vec{y}}_{tj1,2} \quad (228)$$

und unter Verwendung von (244), (177) und (178) auf

$$\begin{aligned} \overrightarrow{O_L \overset{\circ}{A}_{1,2}} &= \dot{\vec{r}}_{t01,2j} + \\ &+ r_t^* \left(\frac{\overrightarrow{M_{t1,2j} \dot{M}_{wj-1,j}}}{|\overrightarrow{M_{t1,2j} \dot{M}_{wj-1,j}}|} - \frac{|\overrightarrow{M_{t1,2j} \dot{M}_{wj-1,j}}|^{\circ}}{|\overrightarrow{M_{t1,2j} \dot{M}_{wj-1,j}}|^2} \cdot \overrightarrow{M_{t1,2j} \dot{M}_{wj-1,j}} \right) \end{aligned} \quad (229)$$

Damit entspricht $\dot{\vec{y}}_{t1,2j}$ der Winkelgeschwindigkeit, mit der das lokale Koordinatensystem um den Mittelpunkt der Käfigtasche rotiert. Diese Größe kann infolge der Radialgeschwindigkeit \dot{r}_j des Wälzkörpers beachtliche Werte annehmen und die Summengeschwindigkeit bzw. den Druck im Schmierspalt beträchtlich erhöhen.

Entsprechend Gleichung (226) und *Bild 54* folgt für die Kenngröße u_2 unter Berücksichtigung der Eigenrotation $\dot{\alpha}$ des Wälzkörpers

$$u_{21,2} = \overrightarrow{O_L \overset{\circ}{B}_{1,2}} \cdot \vec{u}_{tj1,2} - r_w^* \dot{\alpha}_{j-1,j} \quad (230)$$

Für die Punkte $B_{1,2}$ gilt analog zu Gleichung (228)

$$\overset{\circ}{O_L} \vec{B}_{1,2} = \dot{\vec{r}}_{j-1,j} - r_w^* \cdot \dot{\vec{y}}_{t1,2j} \quad (231)$$

Damit sind alle Kenngrößen bei Taschenlage bekannt.

Bei Kippen des Wälzkörpers ist zunächst zu klären, ob der Wälzkörper an der inneren oder äußeren Stegecke anliegt. Dazu muß man entscheiden, ob sich der Wälzkörpermittelpunkt oberhalb oder unterhalb der Taschenmitte befindet (s. *Bild 54*). Es gilt

$$|\overrightarrow{O_{Kj}M_{wj-1,j}}| > r_{kt}^* \Rightarrow \vec{r}_{se1,2} = r_{ka}^* \begin{pmatrix} \sin(\beta kj \mp \delta_a/2) \\ \cos(\beta kj \mp \delta_a/2) \end{pmatrix} \quad (232)$$

oder

$$|\overrightarrow{O_{Kj}M_{wj-1,j}}| < r_{kt}^* \Rightarrow \vec{r}_{se1,2} = r_{ki}^* \begin{pmatrix} \sin(\beta kj \mp \delta_i/2) \\ \cos(\beta kj \mp \delta_i/2) \end{pmatrix} \quad (233)$$

Der Vektor

$$\overrightarrow{M_{wj-1,j}A_{1,2}} = \vec{e}_k + \overrightarrow{O_K O_{Kj}} + \vec{r}_{se1,2} - \vec{r}_{j-1,j} \quad (234)$$

liefert die nominellen Schmierspalthöhen

$$h_{nom1,2} = |\overrightarrow{M_{wj-1,j}A_{1,2}}| - r_w^* \quad (235)$$

und unter Verwendung der Gleichungen (177) und (178) die Annäherungsgeschwindigkeiten

$$v_{m1,2} = -|\overrightarrow{M_{wj-1,j}A_{1,2}}|^\circ \quad (236)$$

Im Gegensatz zur Taschenlage rotiert beim Kippen das lokale Koordinatensystem nicht um den Taschenmittelpunkt, sondern verharrt

während des Kippvorganges an der betreffenden Stegecke. Die Umfangsgeschwindigkeiten erhält man dann mit den Gleichungen (226) und (230) unter Berücksichtigung von

$$\overrightarrow{O_L \overset{\circ}{A}}_{1,2} = \dot{e}_k + \overrightarrow{O_K \overset{\circ}{O}}_{Kj} + \dot{r}_{se1,2} \quad (237)$$

$$\overrightarrow{O_L \overset{\circ}{B}}_{1,2} = \dot{r}_{j-1,j} - r_w^* \cdot \dot{y}_{t1,2j} \quad (238)$$

$$\vec{y}_{tj1,2} = - \frac{\overrightarrow{M_{wj-1,j} \overset{\circ}{A}}_{1,2}}{|\overrightarrow{M_{wj-1,j} \overset{\circ}{A}}_{1,2}|} \quad (239)$$

und $\vec{u}_{tj1,2}$ nach Gleichung (225). Ähnlich wie in Gleichung (228) läßt sich hier $\dot{y}_{t1,2j}$ als Winkelgeschwindigkeit deuten, mit der der Punkt $B_{1,2}$ momentan um den Wälzkörpermittelpunkt rotiert.

Bei der Bestimmung der äußeren Kräfte und Momente für die Bewegungsgleichungen und die Verformungsrechnung geht man vor wie in Abschnitt 7.3.3 für Käfige mit gerader Taschenkontur beschrieben.

7.3.5 Wälzkörper - Wälzkörper. Bei vollrolligen Lagern berühren sich die Wälzkörper direkt. Mit *Bild 55* gilt für die nominelle Schmierspalthöhe in diesen Kontakten

$$h_{nom} = |\overrightarrow{M_{wj} \overset{\circ}{M}}_{wj+1}| - 2r_w^* \quad (240)$$

mit

$$\overrightarrow{M_{wj} \overset{\circ}{M}}_{wj+1} = \vec{r}_{j+1} - \vec{r}_j \quad (241)$$

und für die Annäherungsgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Gleichungen (177), (178)

$$v_m = -|\overrightarrow{M_{wj} \overset{\circ}{M}}_{wj+1}| \quad (242)$$

Die Umfangsgeschwindigkeiten ergeben sich aus der Projektion der Punkte A und B auf die u -Richtung des lokalen Koordinatensystems:

$$u_1 = \overrightarrow{O_L \overset{\circ}{A}} \cdot \vec{u}_{wj} + r_w^* \dot{\alpha}_{j+1} \quad (243)$$

$$u_2 = \overrightarrow{O_L \overset{\circ}{B}} \cdot \vec{u}_{wj} + r_w^* \dot{\alpha}_j \quad (244)$$

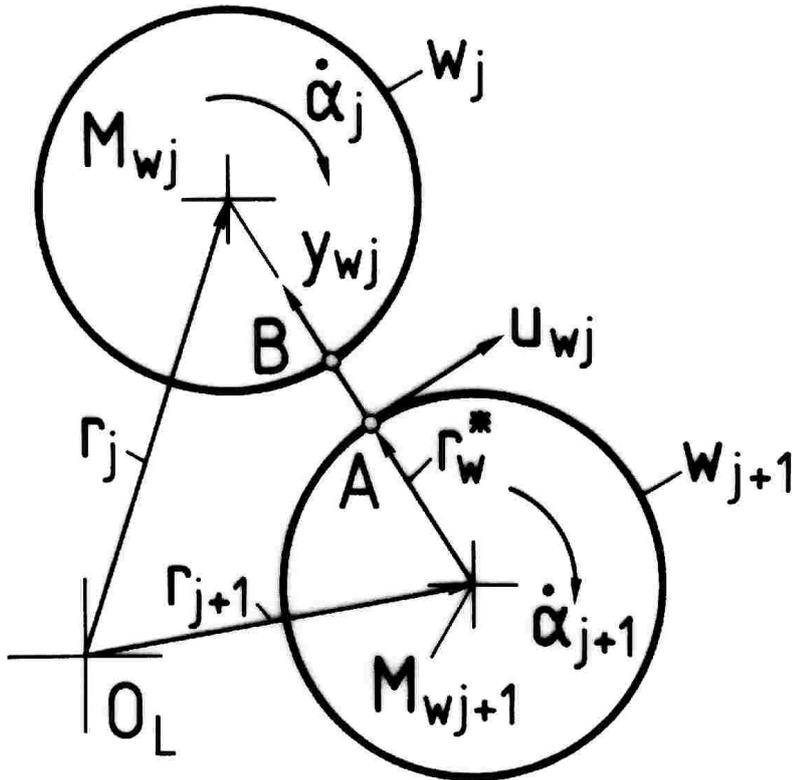


Bild 55: Schmierspalt Wälzkörper-Wälzkörper

Aus den Bestimmungsgleichungen für die Ortsvektoren von \$A\$ und \$B\$ gewinnt man durch Differenzieren

$$\overset{\circ}{O_L A} = \dot{r}_{j+1} + r_w^* \cdot \dot{y}_{W_j} \tag{245}$$

$$\overset{\circ}{O_L B} = \dot{r}_j - r_w^* \cdot \dot{y}_{W_j} \tag{246}$$

Aus den letzten Gleichungen läßt sich ablesen, daß die Punkte \$A\$ und \$B\$ gegenläufig mit der Winkelgeschwindigkeit \$\dot{y}_{W_j}\$ um den entsprechenden Wälzkörpermittelpunkt rotieren.

Die Einheitsvektoren des lokalen Koordinatensystems lauten nach Bild 55

$$\vec{y}_{W_j} = - \frac{\overrightarrow{M_{W_j} M_{W_{j+1}}}}{|\overrightarrow{M_{W_j} M_{W_{j+1}}}|} \tag{247}$$

$$\vec{u}_{W_j} = \begin{pmatrix} + (\vec{y}_{W_j})_y \\ - (\vec{y}_{W_j})_x \end{pmatrix} \tag{248}$$

7.3.6 Käfig - Führungsbord, außen. Für die Berechnung der Schmierspaltkräfte zwischen Käfig und Führungsbord bestimmt man die Schmierspaltkenngößen zwischen den Führungsflächen an jedem Knotenpunkt des Käfig-Ersatzringes (vgl. Abschnitt 6.1) und erhält aus den EHD-Näherungsgleichungen die Verformungskräfte. Außerdem geht die resultierende Belastung des Käfigs in die Bewegungsgleichungen (60), (62) und (64) ein.

Nach *Bild 56* gilt für die nominelle Schmierspalthöhe an dem Knoten l

$$h_{nom} = |\overrightarrow{O_{Kl}A}| - |\vec{r}_{bkal}| \quad (249)$$

Darin bezeichnet r_{bkal} den Radius, auf dem sich der verformte Käfig an dem Führungsbord abstützt. Der Vektor

$$\overrightarrow{O_{Kl}A} = r_{okla} \begin{pmatrix} \sin \beta_{kl} \\ \cos \beta_{kl} \end{pmatrix} \quad (250)$$

ist durch den Lagewinkel des Knotens l und den Betrag

$$\begin{aligned} r_{okla} = & -\overrightarrow{O_A} \dot{O}_{Kl} \begin{pmatrix} \sin \beta_{kl} \\ \cos \beta_{kl} \end{pmatrix} \\ & + \sqrt{\left[\overrightarrow{O_A} \dot{O}_{Kl} \begin{pmatrix} \sin \beta_{kl} \\ \cos \beta_{kl} \end{pmatrix} \right]^2 - |\overrightarrow{O_A} \dot{O}_{Kl}|^2 + r_{bra}^2} \end{aligned} \quad (251)$$

mit

$$\overrightarrow{O_A} \dot{O}_{Kl} = -\vec{e}_a + \vec{e}_k + \overrightarrow{O_K} \dot{O}_{Kl} \quad (252)$$

und $\overrightarrow{O_K} \dot{O}_{Kl}$ entsprechend Gleichung (206) definiert.

Die Abstandsänderung der Punkte O_{Kl} und A ergibt die Annäherungsgeschwindigkeit

$$v_m = -|\overrightarrow{O_{Kl}A}|^\circ \quad (253)$$

Die Komponente der Geschwindigkeit von A in u-Richtung des lokalen Koordinatensystems ergibt als nächste Kenngröße die Umfangsgeschwindigkeit

$$u_1 = \overrightarrow{O_L A} \cdot \vec{u}_{bkal} \quad (254)$$

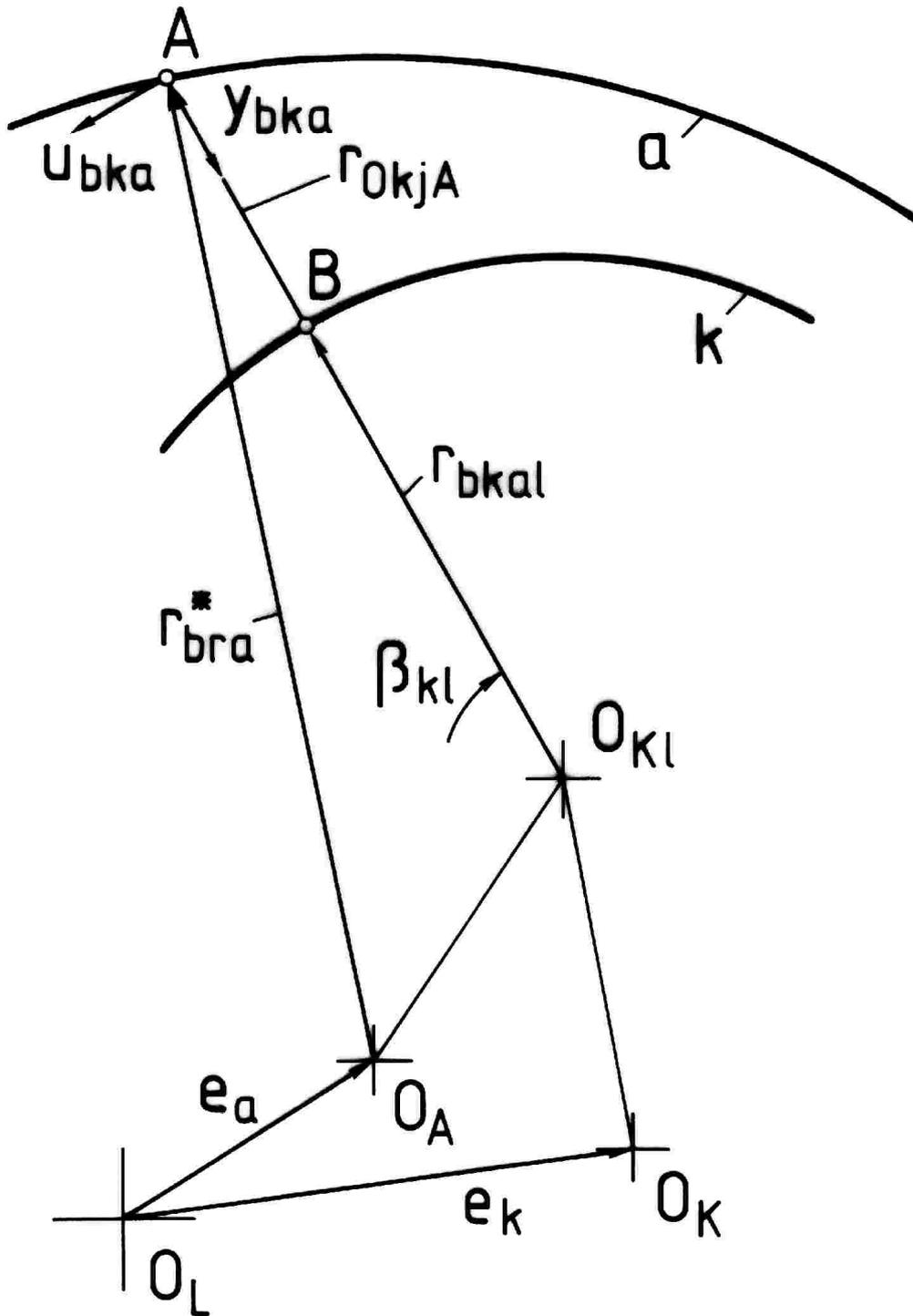


Bild 56: Schmierspalt Käfig-Führungsbord, außen

während man mit der Geschwindigkeit des Punktes B und der Eigenwinkelgeschwindigkeit $\dot{\beta}_k$ des Käfigs

$$u_2 = \overrightarrow{O_L B} \cdot \vec{u}_{bka} - r_{bka} \dot{\beta}_k \quad (255)$$

erhält. Aus den Bestimmungsgleichungen für die Ortsvektoren folgt nach

Differentiation

$$\overrightarrow{O_L \dot{A}} = \dot{e}_k + \overrightarrow{O_K \dot{O}_{Kl}} + \overrightarrow{O_{Kl} \dot{A}} \quad (256)$$

$$\overrightarrow{O_L \dot{B}} = \dot{e}_k + \overrightarrow{O_K \dot{O}_{Kl}} + \dot{r}_{bkal} \quad (257)$$

und für die u-Richtung des lokalen Koordinatensystems

$$\vec{u}_{bkal} = \begin{pmatrix} -\cos \beta_{kl} \\ +\sin \beta_{kl} \end{pmatrix} \quad (258)$$

7.3.7 Käfig - Führungsbord, innen. Die Herleitung der Kenngrößen für die Schmierspalte bei innenbordgeführten Käfigen erfolgt analog Abschnitt 7.3.6. Nach *Bild 57* ergeben sich folgende Beziehungen

$$h_{nom} = |\vec{r}_{bkil}| - |\overrightarrow{O_{Kl} \dot{A}}| \quad (259)$$

$$v_m = -|\overrightarrow{O_{Kl} \dot{A}}|^\circ \quad (260)$$

$$u_1 = \overrightarrow{O_L \dot{A}} \cdot \vec{u}_{bkil} \quad (261)$$

$$u_2 = \overrightarrow{O_L \dot{B}} \cdot \vec{u}_{bkil} - r_{bkil} \dot{\beta}_k \quad (262)$$

mit

$$\overrightarrow{O_{Kl} \dot{A}} = r_{okla} \begin{pmatrix} \sin \beta_{kl} \\ \cos \beta_{kl} \end{pmatrix} \quad (263)$$

$$r_{okla} = -\overrightarrow{O_I \dot{O}_{Kl}} \begin{pmatrix} \sin \beta_{kl} \\ \cos \beta_{kl} \end{pmatrix} + \sqrt{\left[\overrightarrow{O_I \dot{O}_{Kl}} \begin{pmatrix} \sin \beta_{kl} \\ \cos \beta_{kl} \end{pmatrix} \right]^2 - |\overrightarrow{O_I \dot{O}_{Kl}}|^2 + r_{bri}^2} \quad (264)$$

$$\overrightarrow{O_L \dot{A}} = \dot{e}_k + \overrightarrow{O_K \dot{O}_{Kl}} + \overrightarrow{O_{Kl} \dot{A}} \quad (265)$$

$$\overrightarrow{O_L \dot{B}} = \dot{e}_k + \overrightarrow{O_K \dot{O}_{Kl}} + \dot{r}_{bkil} \quad (266)$$

$$\vec{u}_{bkil} = \begin{pmatrix} -\cos \beta_{kl} \\ +\sin \beta_{kl} \end{pmatrix} \quad (267)$$

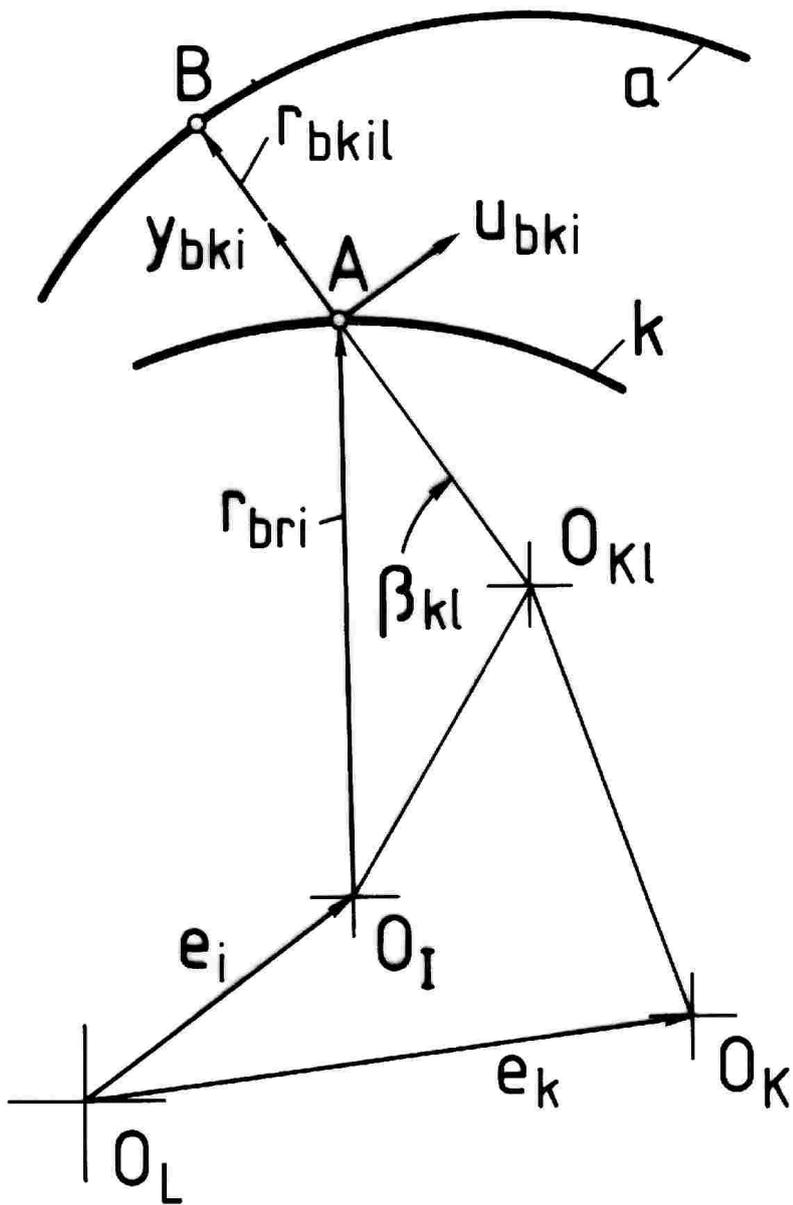


Bild 57: Schmierspalt Käfig-Führungsbord, innen

8 Messungen

Zur Kontrolle der Ergebnisse des Simulationsprogrammes dienen Messungen an Wälzlagern mit zylindrischen Rollkörpern bei unterschiedlicher Bauart und -größe. Als charakteristische Größen eines Betriebszustandes im Lager bieten sich für die Messung das Reibmoment und der Schlupf des Käfigs bzw. des Wälzkörperpaketes an. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde darum ein Prüfstand speziell für die Messung dieser Größen entworfen und gebaut.

8.1 Meßmethode

Das Reibmoment einer Lagerung ist nach DIN 50281 [10] das Moment, das infolge der Reibung als mechanischer Widerstand gegen Drehung auftritt.

$$M_r = F_R r \quad (268)$$

Darin bedeutet

F_R Reibungskraft

r Hebelarm der Drehung.

Bei unbelasteten Wälzlagern kann man das Reibmoment direkt über die auf den stehenden Lagerring in Umfangsrichtung wirkende Kraft messen. Für praxisgerechte Untersuchungen muß aber eine Belastung der Lager möglich sein. Eschmann [11] weist darauf hin, daß Prüflasten hydrostatisch aufzubringen sind, da bei einer festen Verbindung zwischen dem Lagerring und der Belastungsvorrichtung eine Reibmomentmessung nicht möglich ist. Bei Reibungswaagen sind Kalibrierungen für jeden zu untersuchenden Betriebsfall notwendig, da sich auch in den Hilfslagern die Reibmomente abhängig von Belastungs-, Drehzahl- und Schmierverhältnissen ändern. Es werden deshalb die jeweils nicht umlaufenden Prüflager in hydrostatischen Gleitlagern geführt und die dort angreifenden Umfangskräfte über Mitnehmer, die auf DMS¹⁾- bestückte Federbleche wirken, zur Anzeige gebracht. Die Reibung der nicht umlaufenden Gleitlager ist vernachlässigbar klein und deshalb ohne merklichen Einfluß auf die Meßergebnisse.

Eine an dem Käfig - bzw. bei vollrolligen Lagern an der Stirnseite eines Wälzkörpers - angebrachte Induktivität ruft bei jeder Umdrehung

¹⁾ Dehnungsmeßstreifen

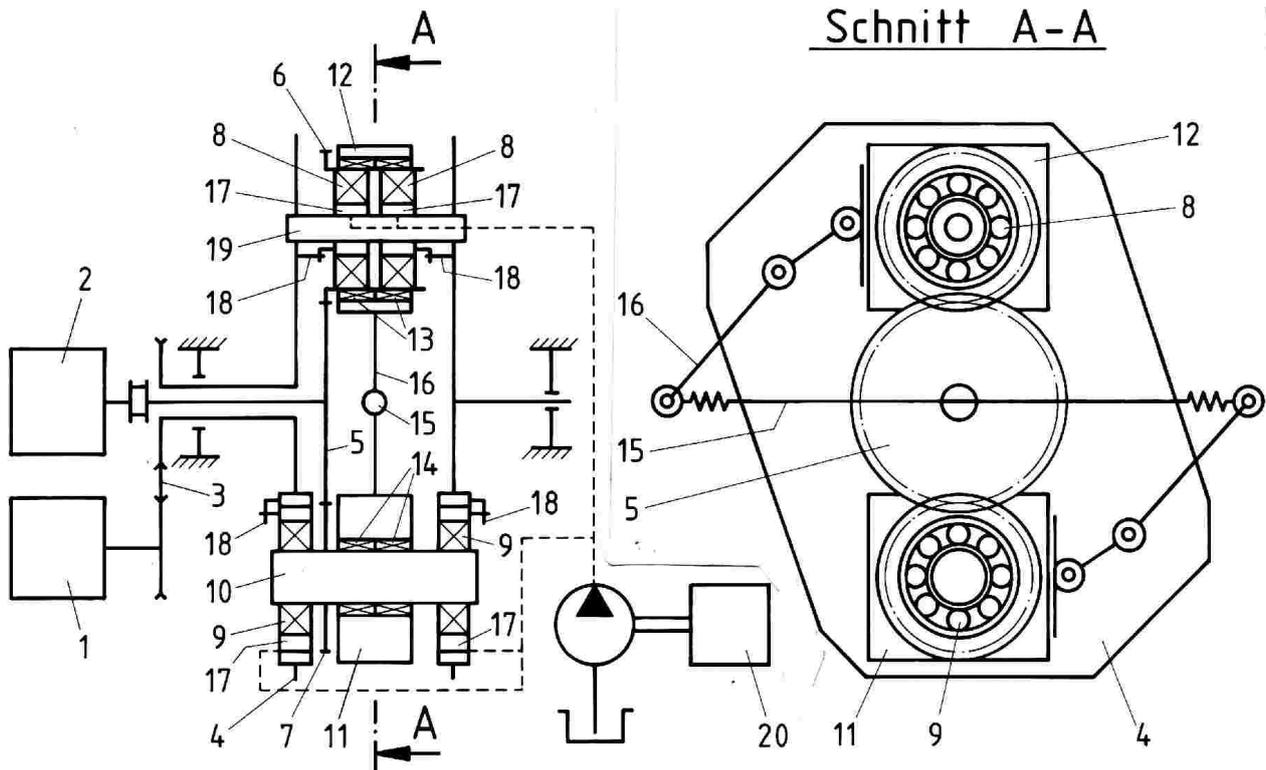


Bild 58: Prüfstand, schematisch

Zählimpulse in einem mit dem Planetenradträger verbundenen Induktiv-aufnehmer hervor. Zur Schlupfmessung werden diese Impulse aufsummiert und mit den gleichzeitig erfassten Umdrehungen des Planetenrades verglichen.

8.2 Prüfstand

Bild 58 zeigt schematisch den Aufbau des Prüfstandes. Der regelbare Gleichstrommotor 1 treibt über einen Keilriementrieb 3 den Planetenradträger 4 und der regelbare Gleichstrommotor 2 das Sonnenrad 5, das mit dem ringförmigen Planetenrad 6 und dem scheibenförmigen Planetenrad 7 kämmt. Die Prüflager 8 mit umlaufendem Außenring übernehmen die Lagerung des Planetenrades 6 und die Prüflager 9 mit umlaufendem Innenring die vom Planetenrad 7 angetriebene Planetenradwelle 10. Die Massen 11 und 12 ersetzen die Planetenradmassen und bewirken im wesentlichen die auf die Prüflager wirkenden Fliehkräfte. Die Massen 11 und 12 werden von

den Stützlagern 13 und 14 aufgenommen. Der Spannarm 15 drückt über die Hebel 16 auf die Planetenradersatzmassen und simuliert damit die Verzahnungskräfte. Die tatsächlich in den Verzahnungen übertragenen Kräfte sind gering, da dort nur die Verlustleistungen der Lager gedeckt werden. Zwischen den Ersatzmassen und den Hebeln befinden sich zur Verringerung der Reibung Nadelflachkäfige.

Für die Messung der Prüflagerreibmomente sind an den Gleitlagerringen 17 am Innenring der Prüflager 8 und am Außenring der Prüflager 9 DMS - bestückte Federbleche 18 angelenkt. Über die Dehnung der kalibrierten Federbleche läßt sich somit das Reibmoment erfassen. Dazu sind aber die Innenringe der Prüflager 8 vom Planetenradbolzen 19 bzw. die Außenringe der Prüflager 9 vom Planetenradträger zu trennen. Zu diesem Zweck erfolgt eine hydrostatische Abstützung der Gleitlagerringe 17. Die Hochdruckpumpe 20 versorgt dazu die vier auf dem Planetenradträger befindlichen hydrostatischen Gleitlager mit Öl.

Die Messung der Lagertemperatur mit Thermoelementen geschieht bei den Prüflagern 8 am Innenring und bei den Prüflagern 9 am Außenring.

Eine Schlupfmessung des Käfigs bzw. des Wälzkörperpaketes mit induktiven Gebern ermöglicht eine Kontrolle der Rechnung.

Ein Schleifringübertrager bringt die DMS - Signale, die Thermospannungen sowie die Zählimpulse der Induktivgeber zur Anzeige.

Die Ölströme der Prüflager, Stützlager und hydrostatischen Gleitlager lassen sich einzeln messen.

Die Passungen der Prüflagersitze entsprechen den Empfehlungen der Wälzlagerhersteller. Lager mit drehendem Innenring erhielten einen festen Sitz (k5) auf der Welle und eine lose Passung (H7) im Planetenradträger, während bei umlaufendem Außenring die Lagersitze g6 und M7 gewählt wurden. Weitere konstruktive Einzelheiten des Prüfgetriebes sind den *Bildern* 59 und 60 zu entnehmen. Den ausgeführten Prüfstand zeigen die *Bilder* 61 und 62.

8.3 Versuchsprogramm

Um den Einfluß von Führungsnormalbeschleunigung a_n und Lagerrelativdrehzahl n_{ps} auf das Reibmoment experimentell zu untersuchen, wurde ein Versuchsprogramm nach *Bild* 63 durchgeführt. Dabei reichten die auf die

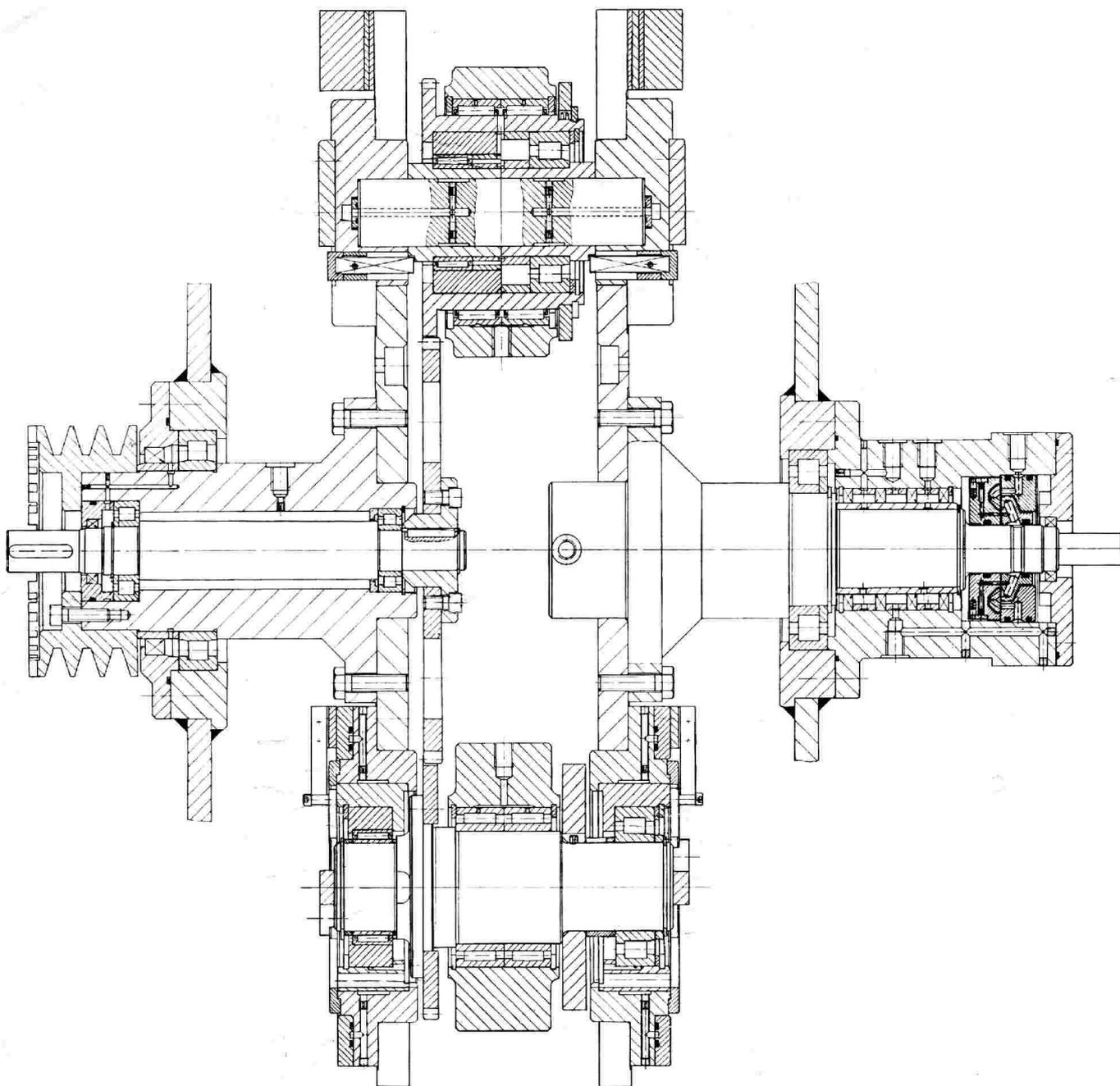


Bild 59: Schnittdarstellung des Prüfgetriebes

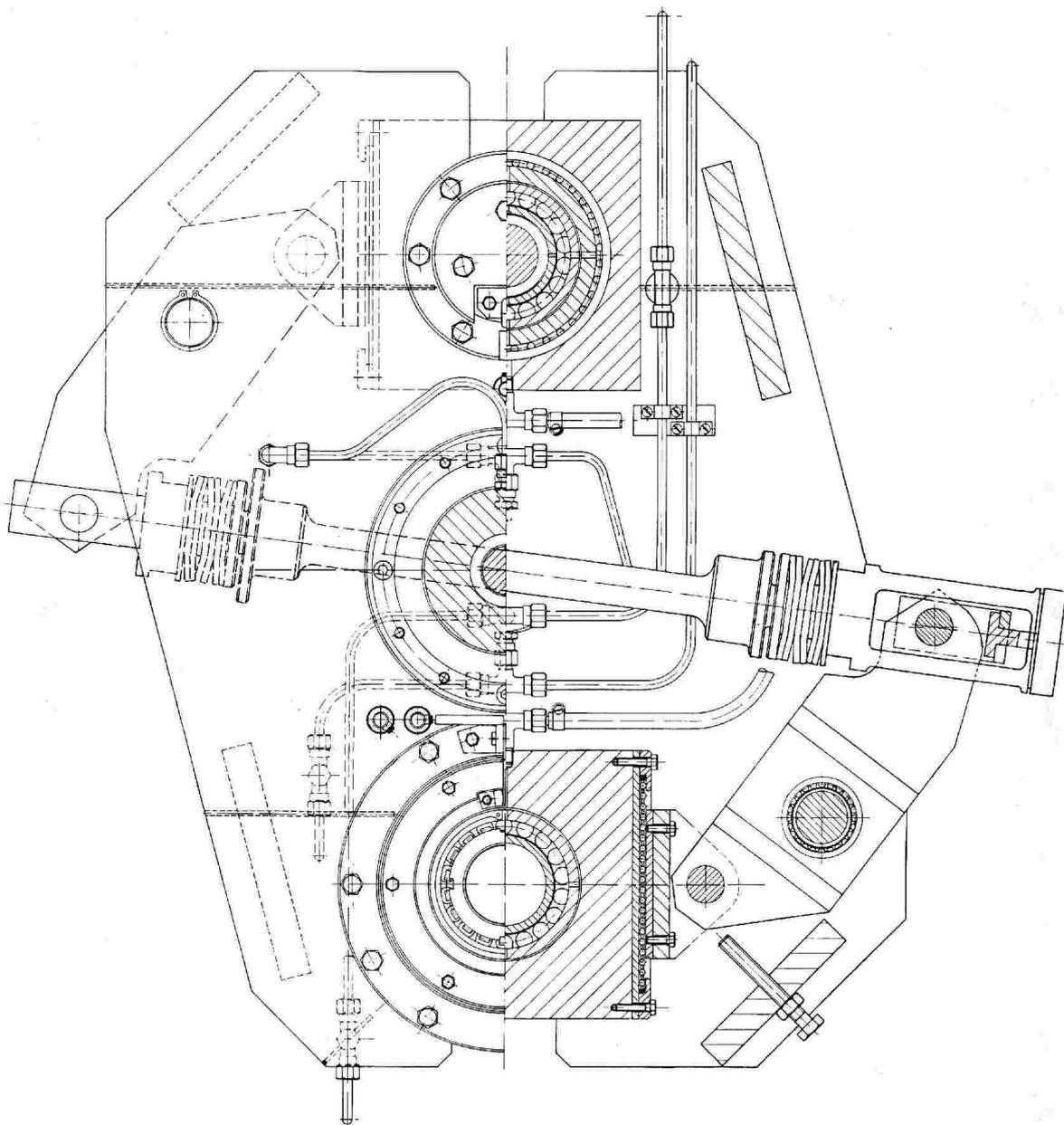


Bild 60: Seitenansicht des Prüfgetriebes

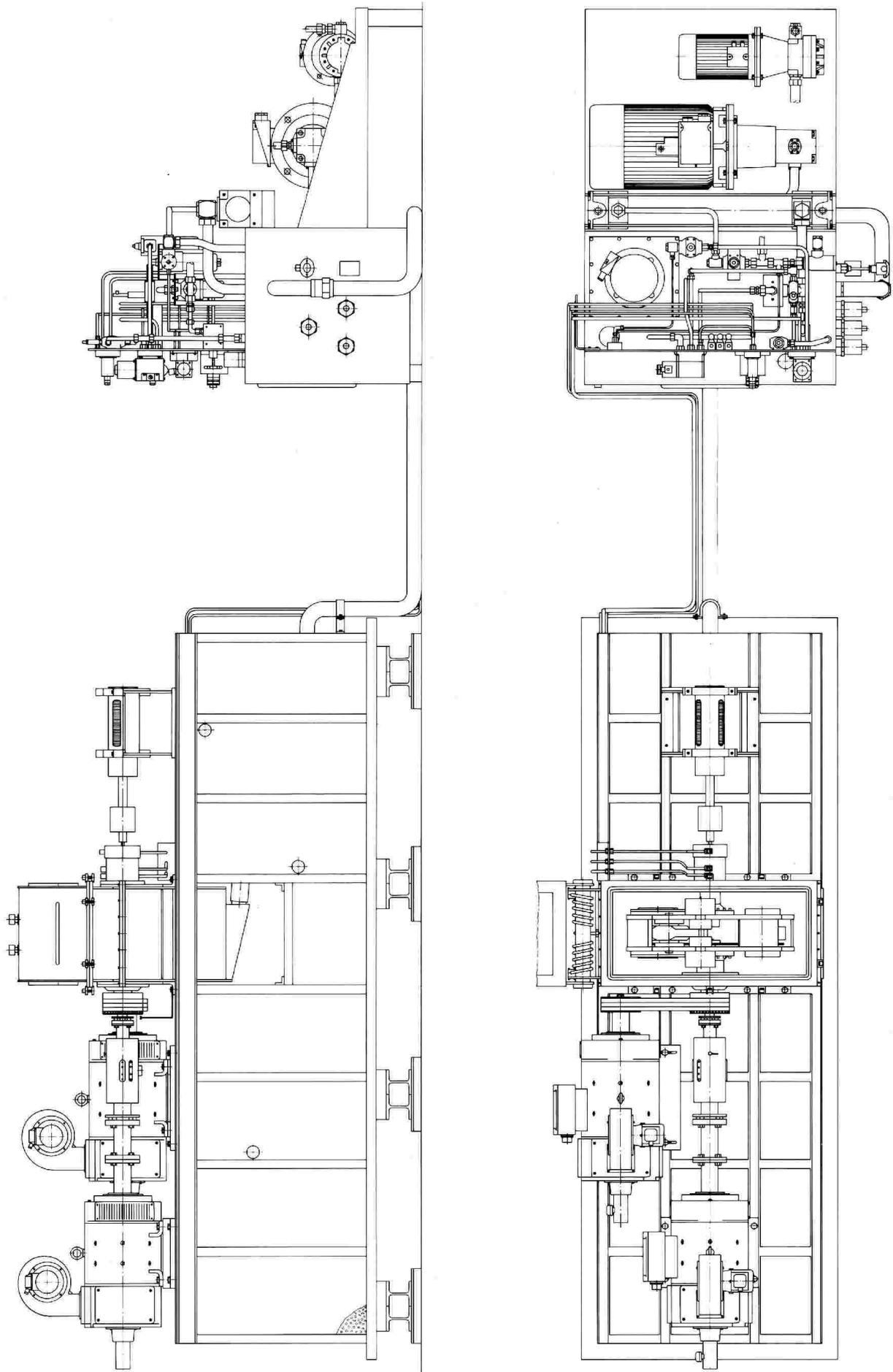


Bild 61: Aufbau des Prüfstandes nach Bild 58

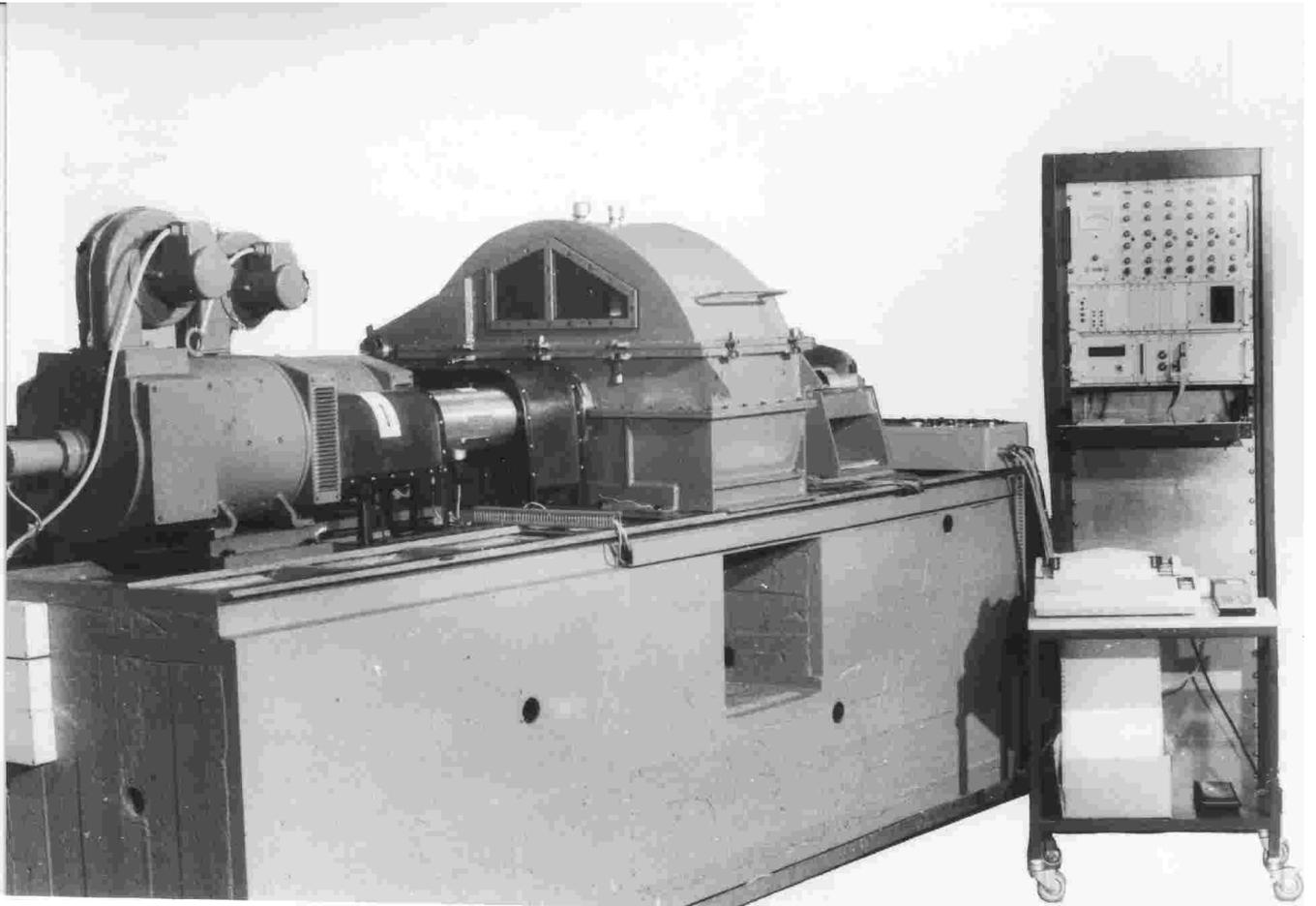


Bild 62: Prüfstand

Prüflager wirkenden Normalbeschleunigungen von 1 bis $300g$ ¹⁾ und die Relativedrehzahlen von 250 min^{-1} bis 1600 min^{-1} . Die im Bild gezeigten Betriebszustände gehen für die Lager SL18 2211, NJ2211 ECP und NJ2211 ECMA bis zu den nach [2] und [3] ermittelten Grenzbelastungen. Bei den Nadellagern NA4911 und NKI55/25 begrenzt der Prüfstand die maximalen Beschleunigungen auf $300g$. Zur Kontrolle von theoretisch ermittelten Reibmomenten ist dieser Bereich als ausreichend groß anzusehen.

Für jeden mit einem Würfel symbolisierten Beschleunigungszustand existieren acht Betriebsfälle nach *Bild 3*. Berücksichtigt man, daß bei den Versuchen mit $1g$ (stehender Planetenradträger) 4 Betriebsfälle identisch sind und das Leerlaufreibmoment gesondert zu messen ist, so waren mit je zwei Prüflagern insgesamt 512 Betriebszustände anzufahren und 1024 Reibmoment-Einzelmessungen durchzuführen.

Vor Versuchsbeginn erfolgte die Messung des Prüflagerspiels in eingebautem

¹⁾ Erdbeschleunigung

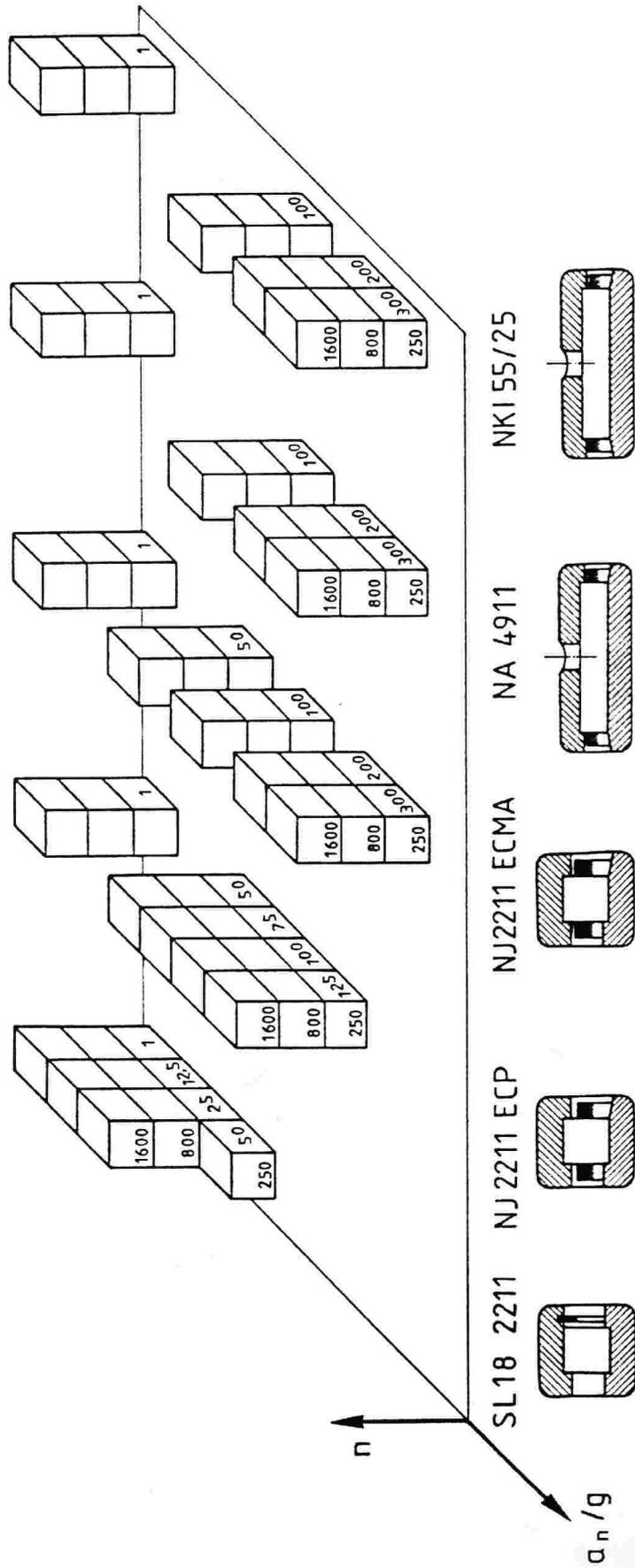


Bild 63: Versuchsprogramm

Zustand. Als Schmiermittel diene das FVA - Referenzöl Nr. 3. Das Reibmoment wurde jeweils bei einer am stehenden Lagerring gemessenen Temperatur von 70°C abgelesen.

8.4 Versuchsergebnisse

8.4.1 Reibmomentmessung. Die *Bilder* 67 bis 96 bringen die Ergebnisse der Messungen. Das Reibmoment ist dabei abhängig von der stegbezogenen Lagerdrehzahl n_{ps} und der bezogenen Führungsnormalbeschleunigung a_n/g aufgetragen. Zum Vergleich wurde bei stehendem Steg ($1g$) das Reibmoment M_0 und das Reibmoment ($M_0 + M_1$) gemessen. Betriebsfälle mit großer Lagerrelativdrehzahl im Verhältnis zur Stegrotation, bei denen die Wälzkörper infolge der Fliehkraft immer den Außenring berühren, also kein Laufbahnwechsel stattfindet, sind entsprechend gekennzeichnet.

Das Reibmoment nimmt - von einer Meßwertstreuung einzelner, benachbarter Betriebszustände abgesehen - mit der Führungsnormalbeschleunigung a_n zu. Dagegen führt eine Erhöhung der Lagerrelativdrehzahl nicht zwangsläufig zu höheren Reibmomenten. Dies wird besonders bei dem Lager NJ2211 ECMA mit dem bordgeführten Messingkäfig deutlich. So nimmt für diesen Lagertyp bei $a_n = 300g$ das Reibmoment mit steigender Lagerrelativdrehzahl n_{ps} in allen Betriebsfällen stark ab. Die bei kleinen Drehzahlen auftretende Mischreibung zwischen Käfig und Lagerbord führt hier zu deutlich größeren Reibungsverlusten als bei einer rein hydrodynamischen Schmierfilmbildung. Für diese Erklärung spricht auch der bei den Versuchen im Öl gefundene Messingabrieb.

Nach Tafel 1 existieren vier ähnliche Betriebsfälle (s. *Bild 3*) bezüglich des Einlaufes der Wälzkörper in die Lastzone.

Tafel 1: Gleichwertige Betriebsfälle

umlaufender Außenring	umlaufender Innenring
a1	d4
b1	c4
a3	d2
b3	c2

Ein Vergleich der Meßergebnisse für diese Betriebsfälle zeigt bei den untersuchten Zylinderrollenlagern eine annähernde Übereinstimmung der Reibmomentverläufe. Exakt gleiche Werte waren wegen der unterschiedlichen Lage der Lastzone und Winkelgeschwindigkeit des Wälzkörperpaketes bei umlaufendem Außenring und umlaufendem Innenring nicht zu erwarten.

Bei den vollrolligen Lagern SL18 2211 und dem Typ NJ2211 ECP mit Kunststoffkäfig fallen deutliche Unterschiede im Reibmoment in den einzelnen Betriebsfällen auf. So liegen die Werte beim Einlauf der Wälzkörper von der stegabgewandten Seite in die Lastzone (b1, c4, b3, c2) auffällig höher als in den übrigen Fällen.

Ein Laufbahnwechsel der Wälzkörper außerhalb der Lastzone scheint dagegen keinen Einfluß auf das Reibungsverhalten zu haben.

Die untersuchten Nadellager weisen aufgrund der kleineren Wälzkörpermassen ein anderes Reibungsverhalten auf (*Bilder 91 bis 106*). Hier führt nicht das Einlaufen der Nadeln von der stegabgewandten Seite in die Lastzone zu höheren Reibmomenten, sondern der Beschleunigungszustand des Lagers. Die Richtung der Coriolisbeschleunigung [12]

$$\vec{a}_{cor} = 2 \cdot \vec{\omega}_{s0} \cdot \vec{v}_{rel} \quad (269)$$

wirkt bei gleichsinniger Drehrichtung von ω_{s0} und $\dot{\beta}_a$ in Richtung des Lagermittelpunktes, während eine gegensinnige Drehrichtung die Umkehrung der Coriolisbeschleunigung zur Folge hat (s. *Bild 64*). Die Radial- und Führungsbeschleunigungen bleiben dagegen unverändert. Die *Bilder 65* und *66* geben an einem Beispiel die in beiden Betriebsfällen entstehenden Fliehkräfte auf die Rollkörper wieder.

Dabei zeigt sich, daß die gegensinnige Drehrichtung einen ähnlichen Beschleunigungszustand hervorruft wie eine hohe Drehzahl des Planeten-

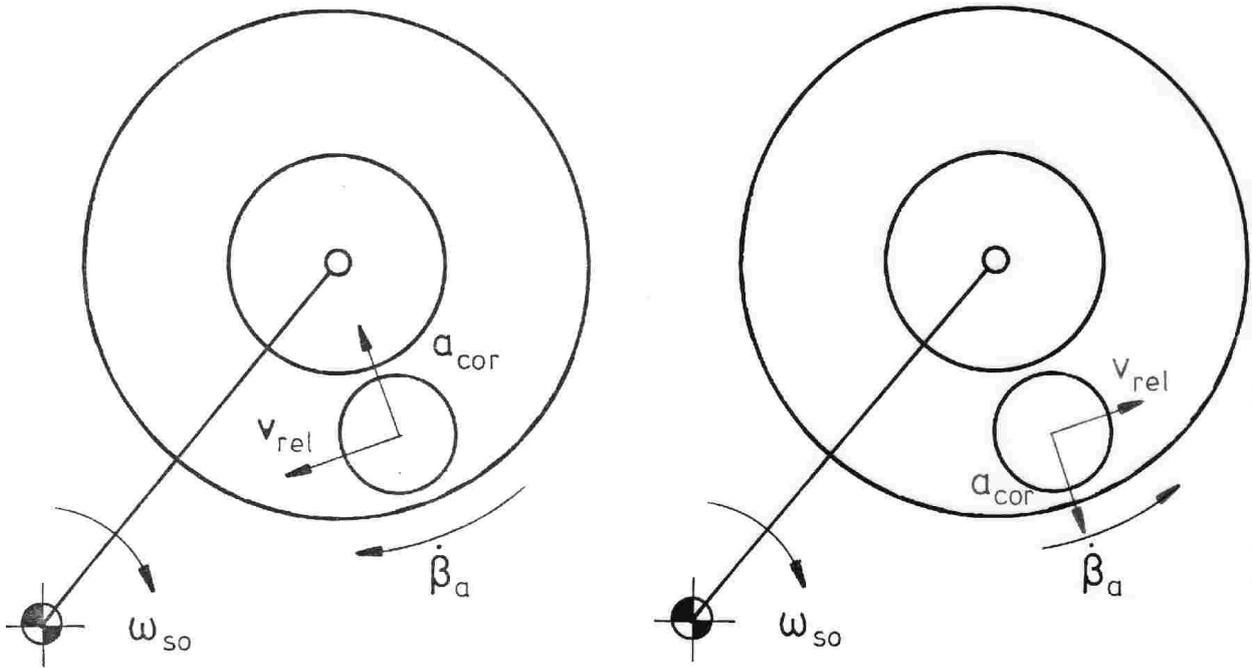


Bild 64: Coriolisbeschleunigung bei gleichsinniger und gegensinniger Drehrichtung von ω_{s0} und $\dot{\beta}_a$

radträgers. Daher weisen die gemessenen Reibmomente in den Betriebszuständen b1, c4, a3 und d2 (gegenseitige Drehrichtungen) höhere Werte auf als in den Fällen a1, d4, b3 und c2 (gleichsinnige Drehrichtungen).

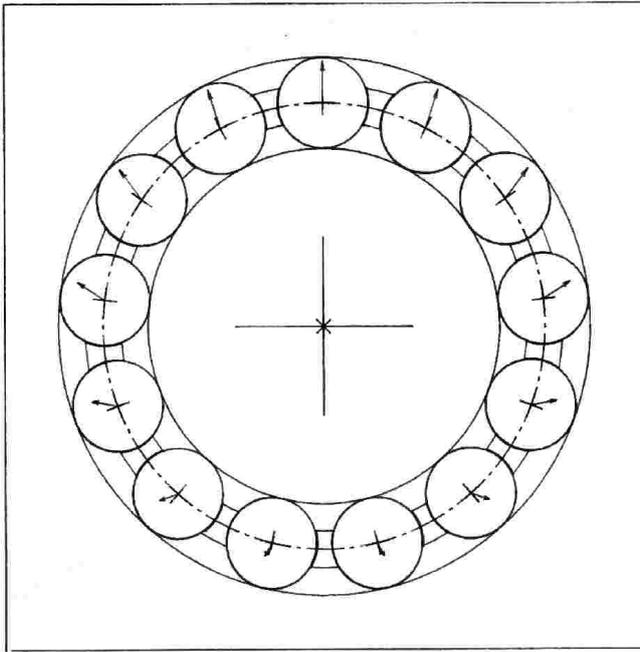


Bild 65: Massenkräfte der Rollkörper bei gleicher Drehrichtung von ω_{s0} und $\dot{\beta}_a$

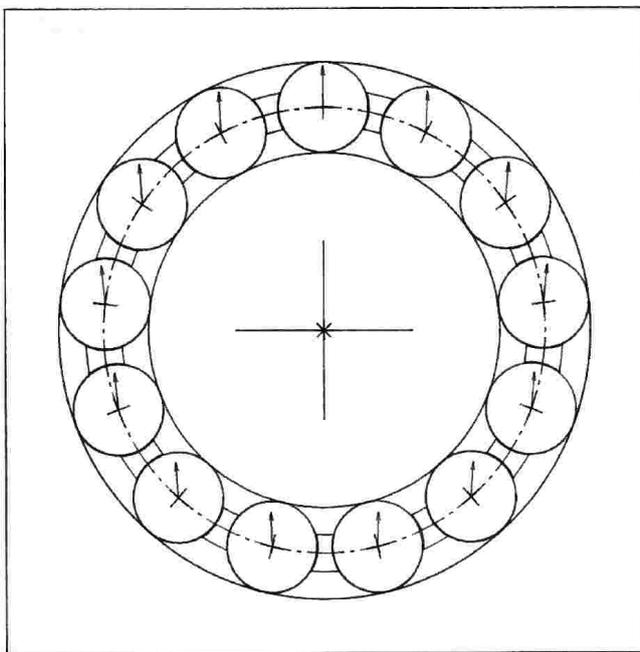


Bild 66: Massenkräfte der Rollkörper bei entgegengesetzter Drehrichtung von ω_{s0} und $\dot{\beta}_a$

Bilder 67 bis 106: Gemessene Reibmomente

M	Reibmoment
n_{ps}	Stegbezogene Lagerdrehzahl
a_n	Führungsnormalbeschleunigung
g	Erdbeschleunigung

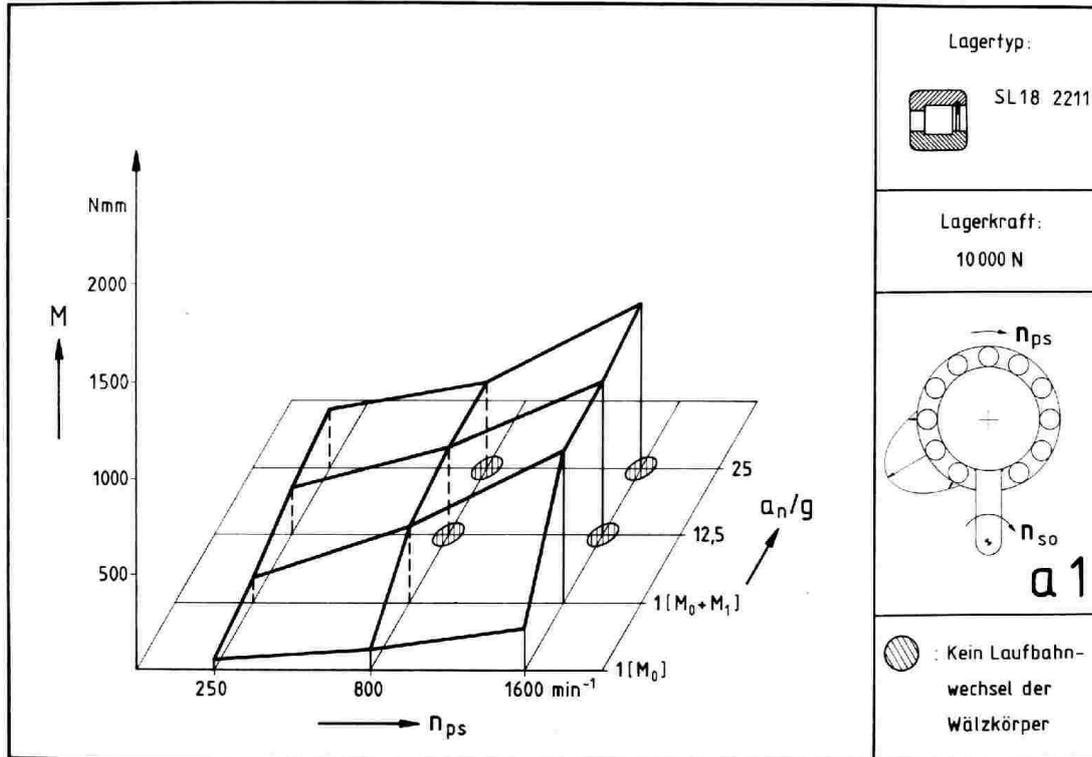


Bild 67

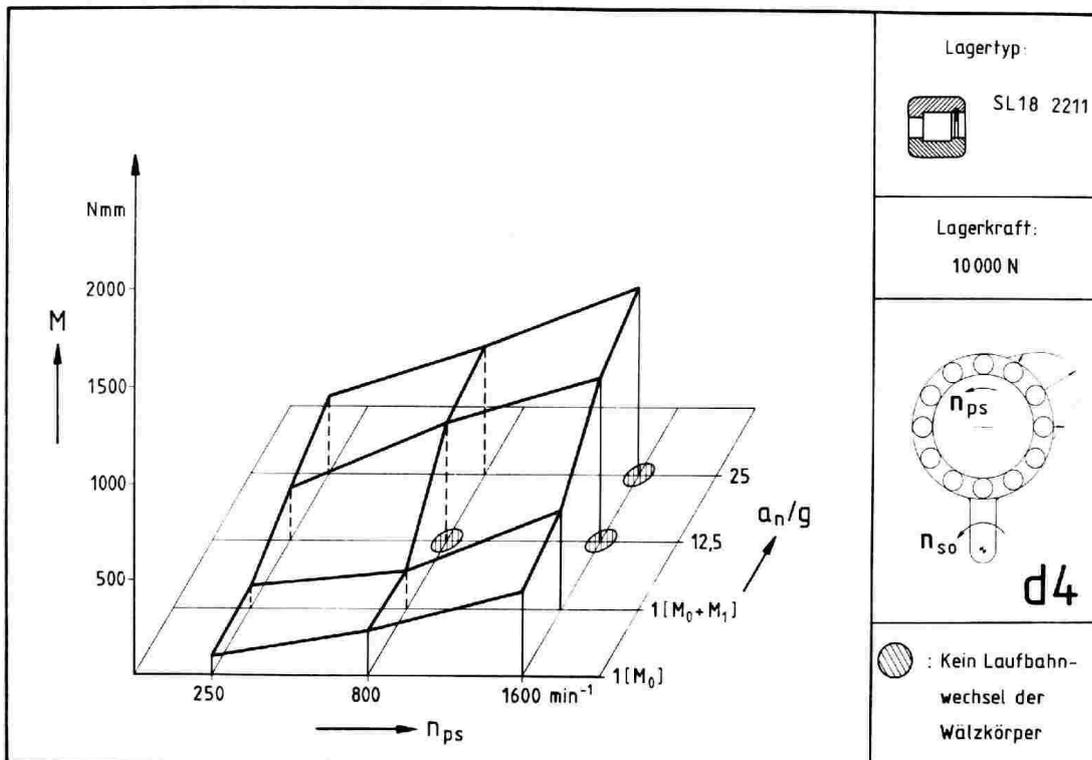


Bild 68

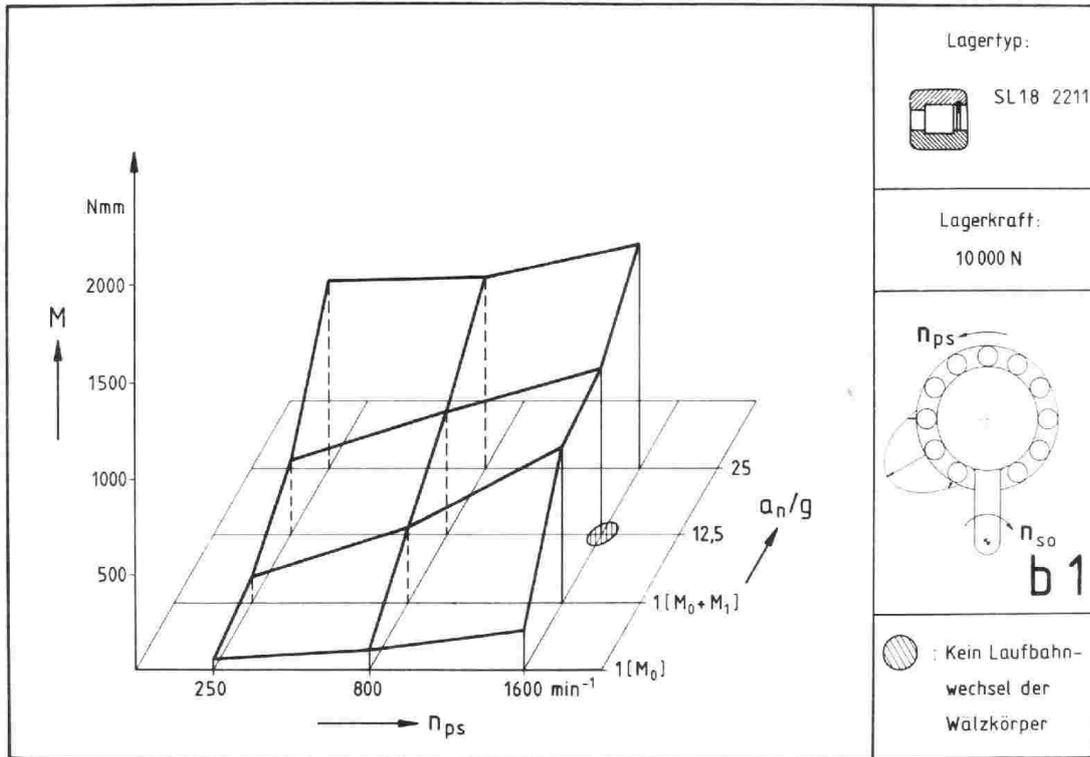


Bild 69

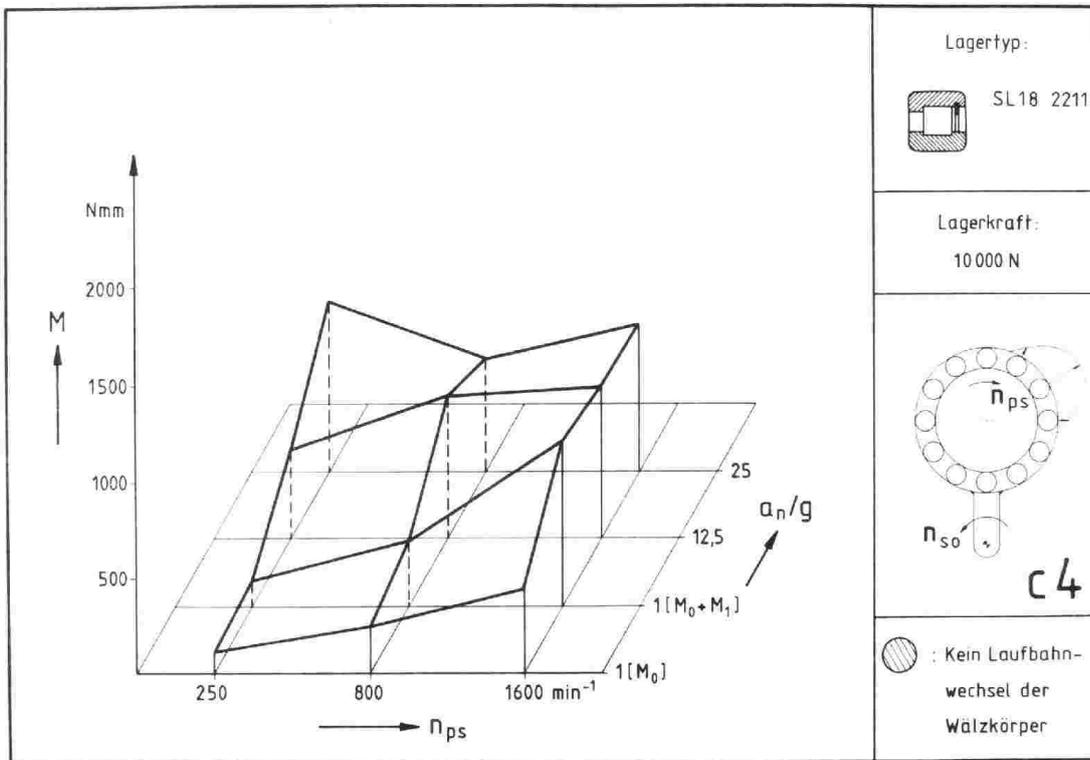


Bild 70

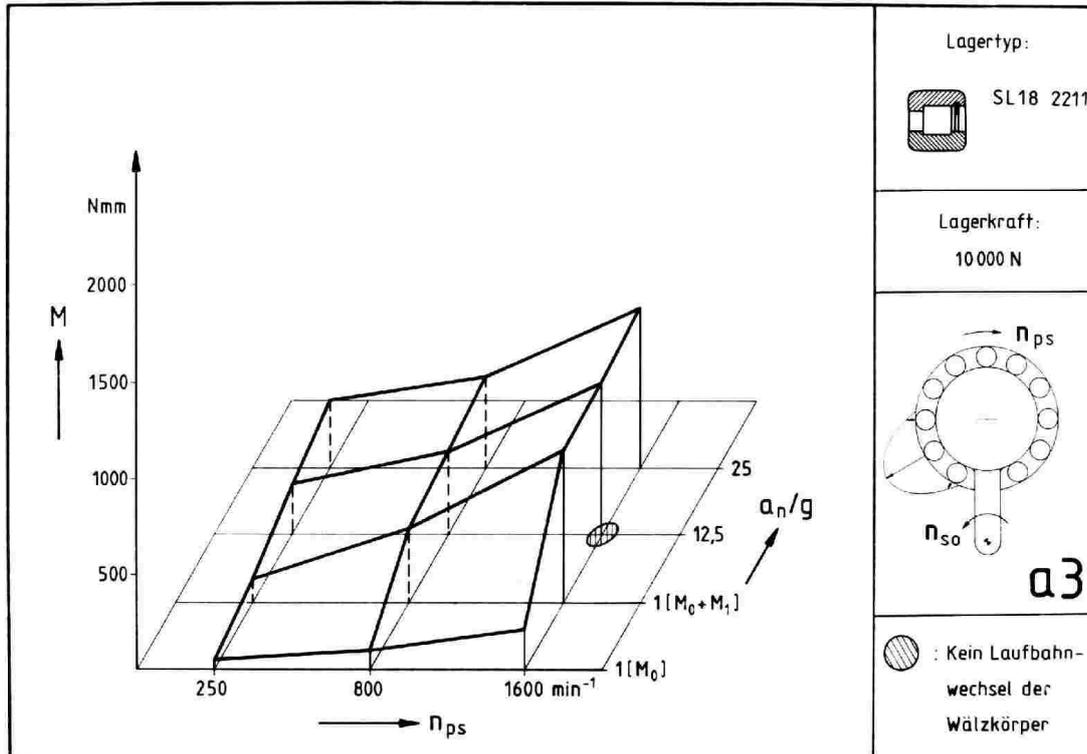


Bild 71

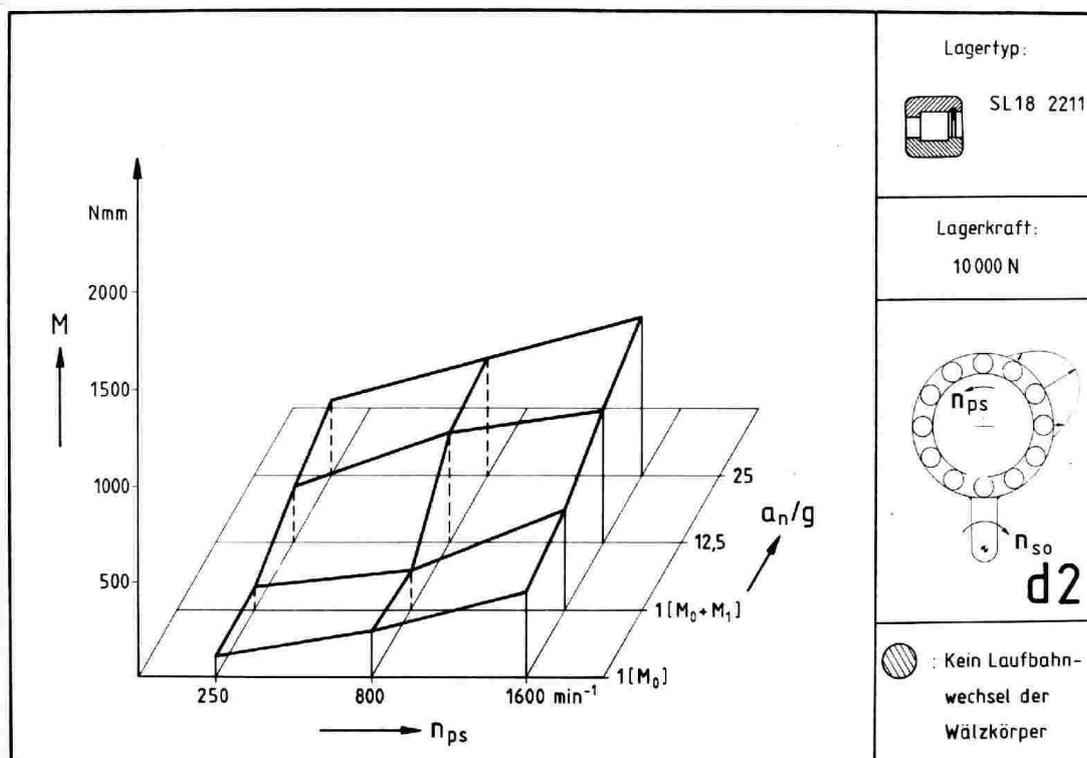


Bild 72

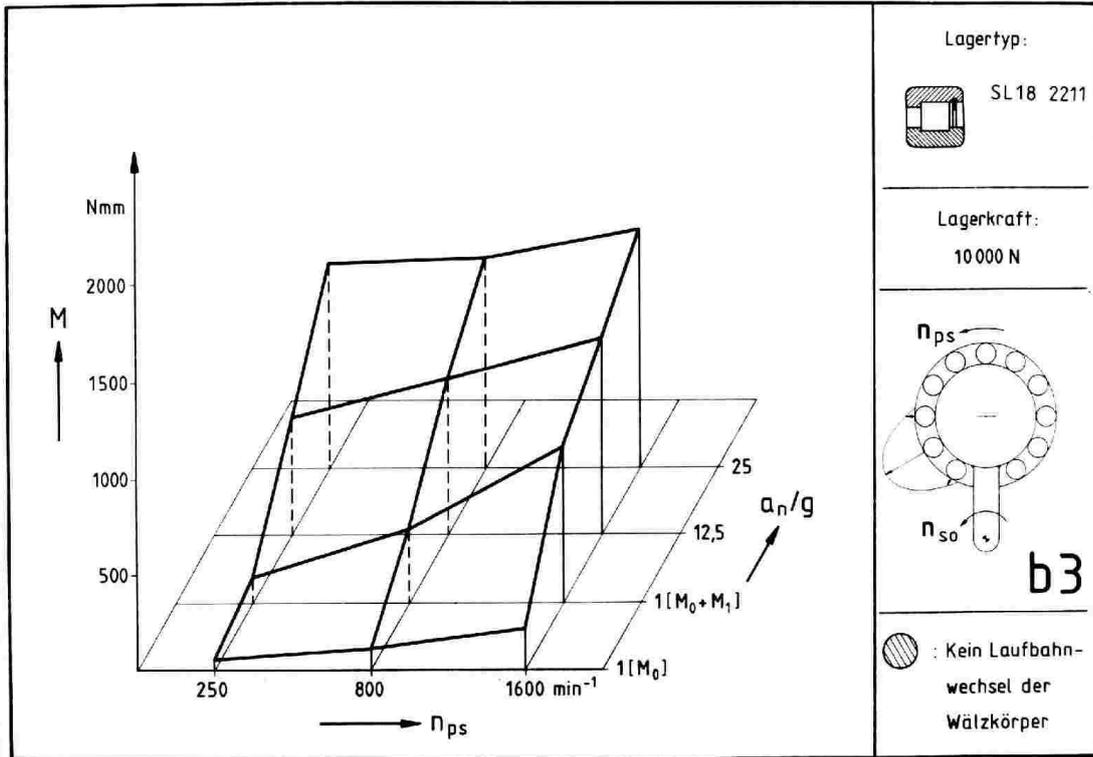


Bild 73

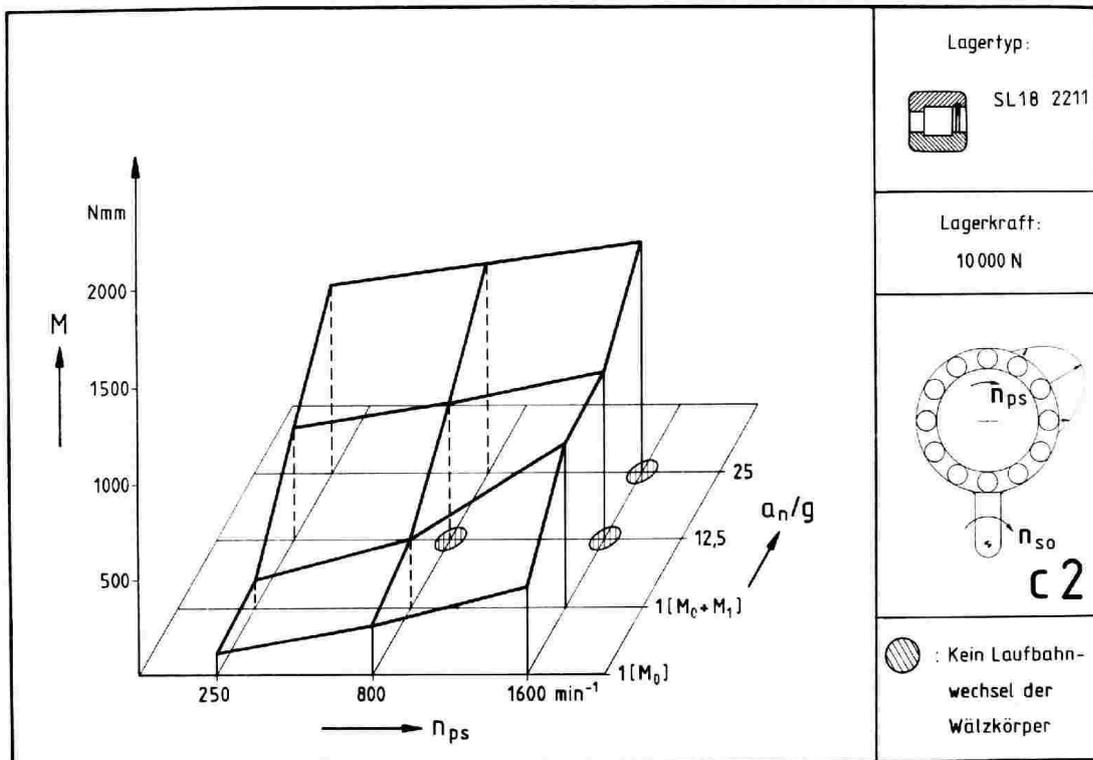


Bild 74

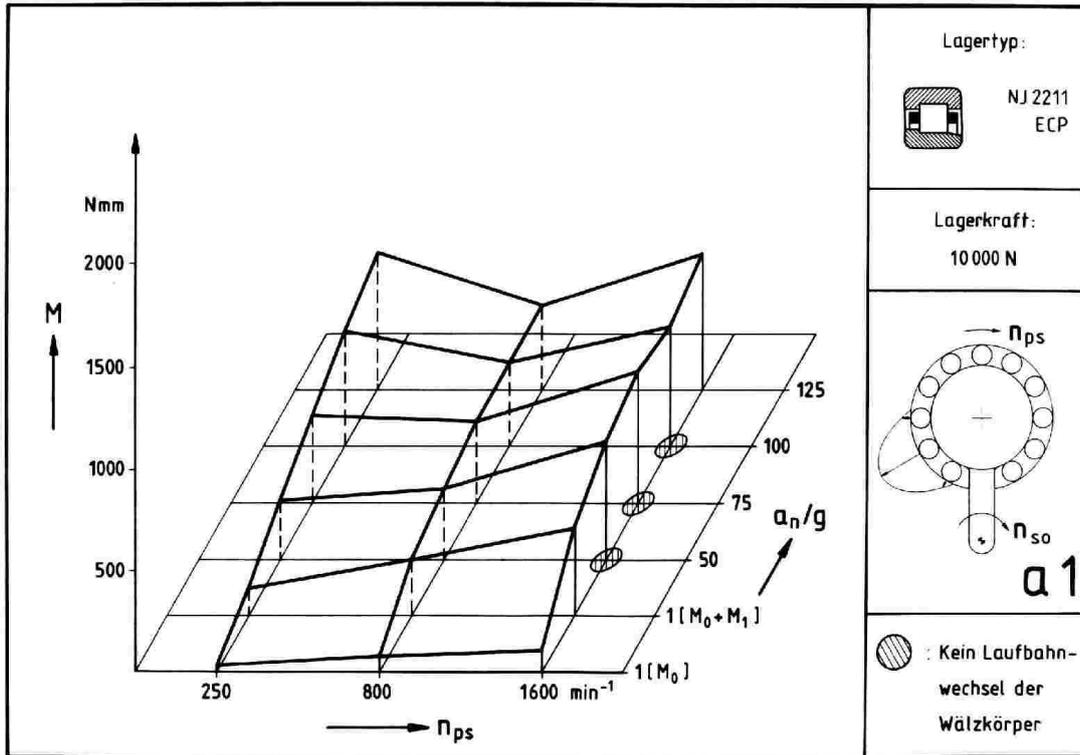


Bild 75

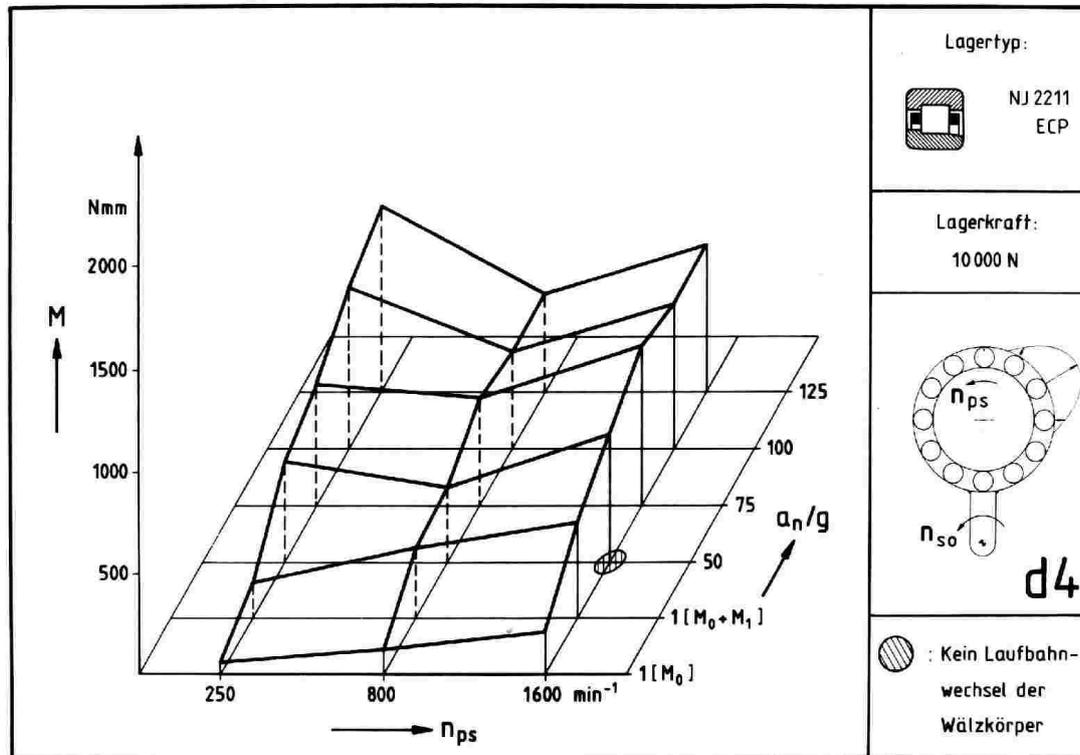


Bild 76

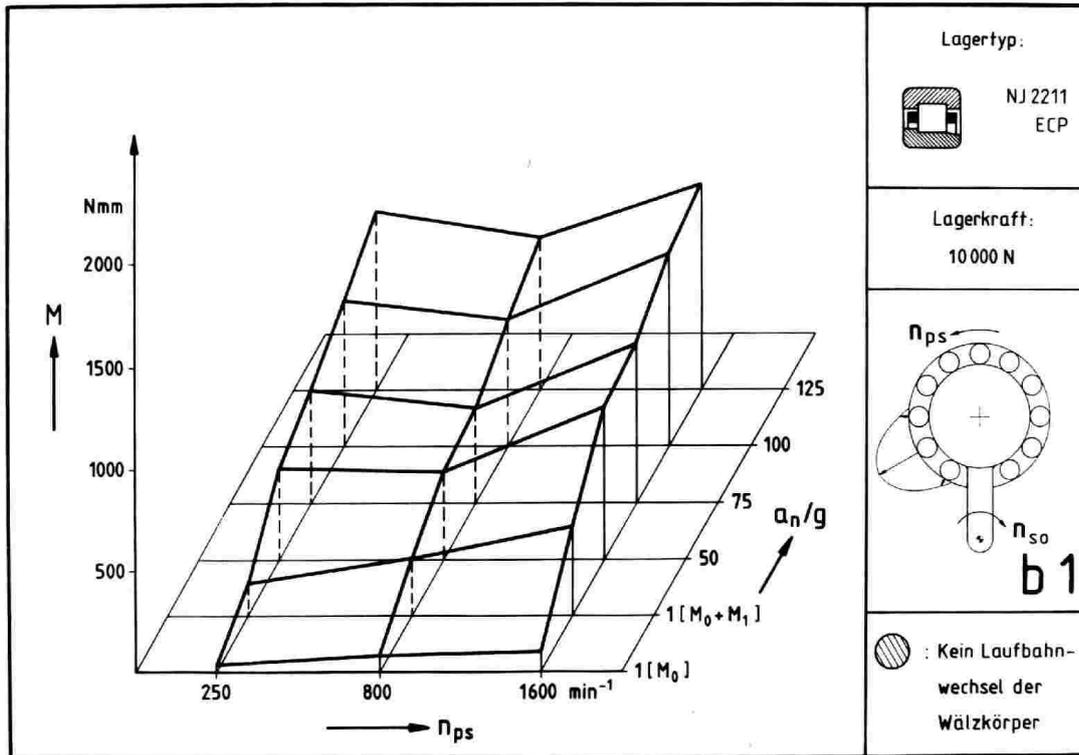


Bild 77

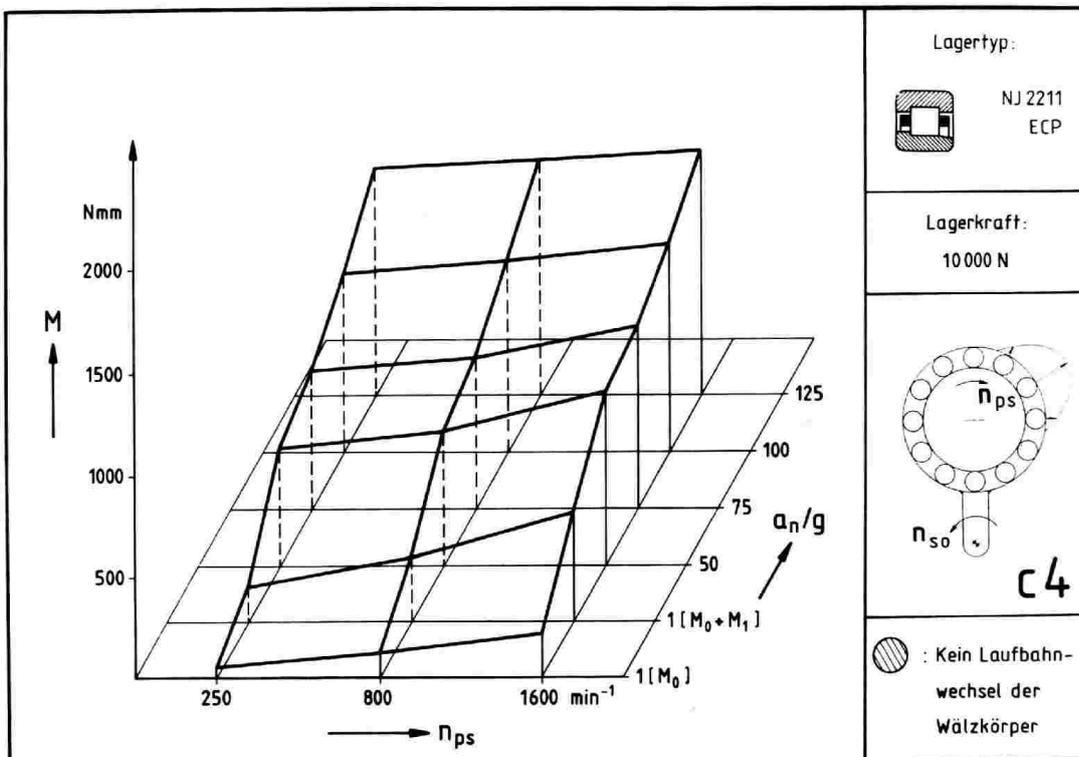


Bild 78

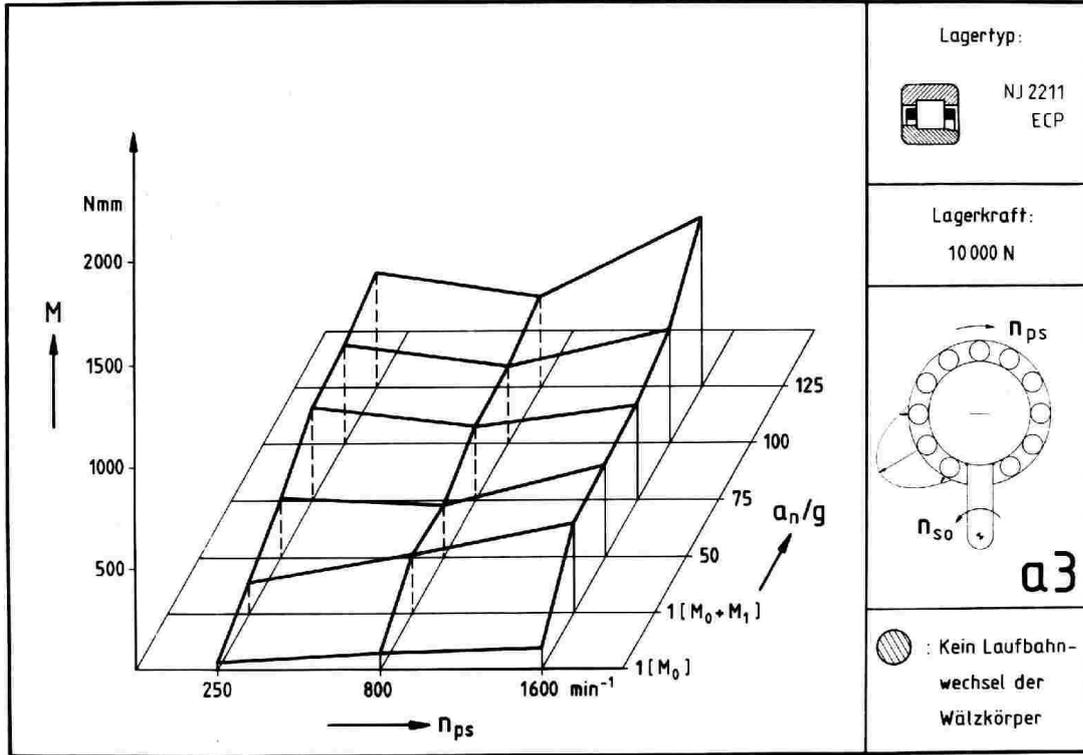


Bild 79

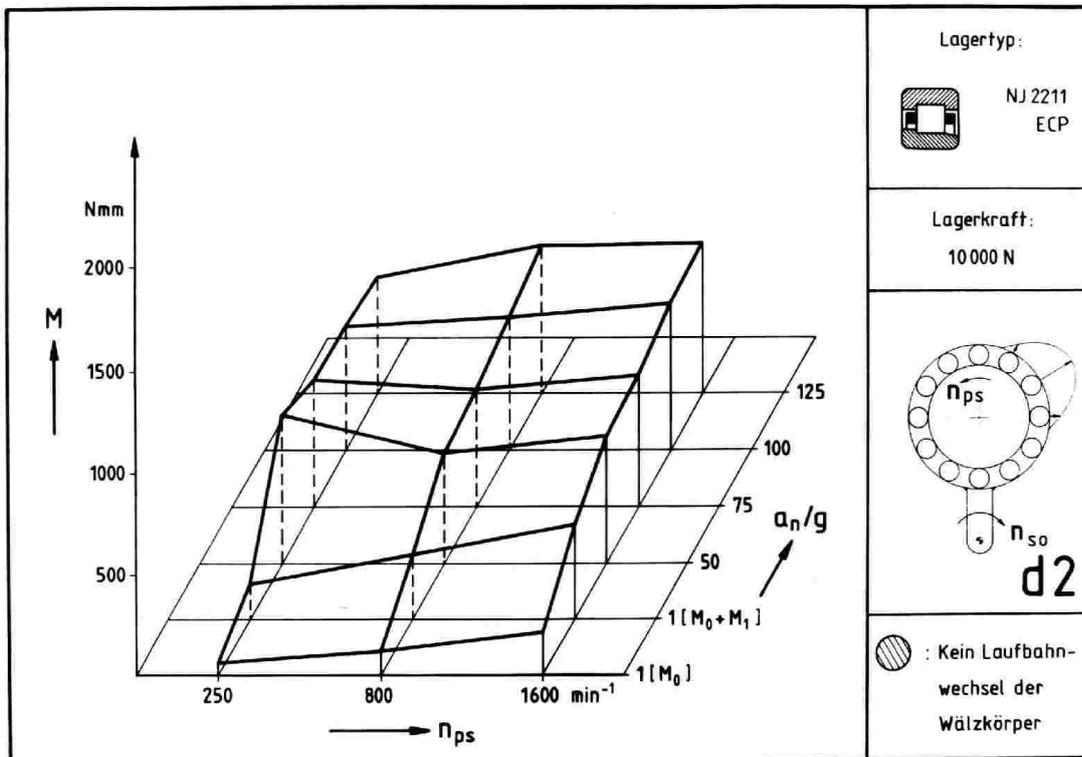


Bild 80

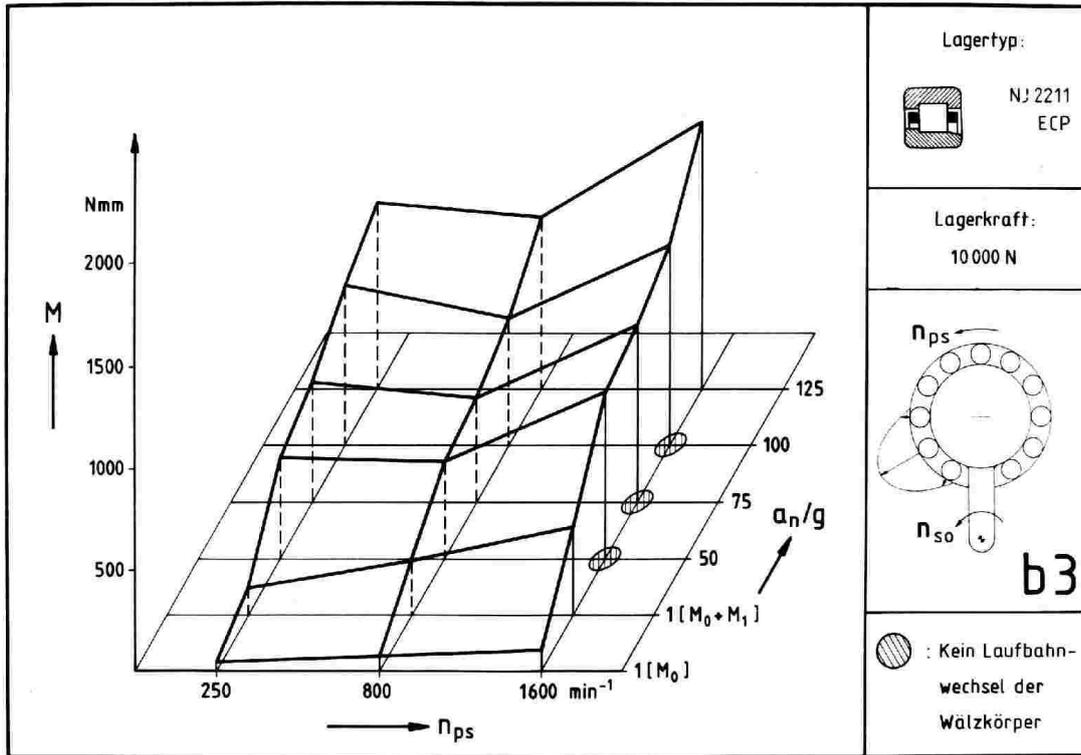


Bild 81

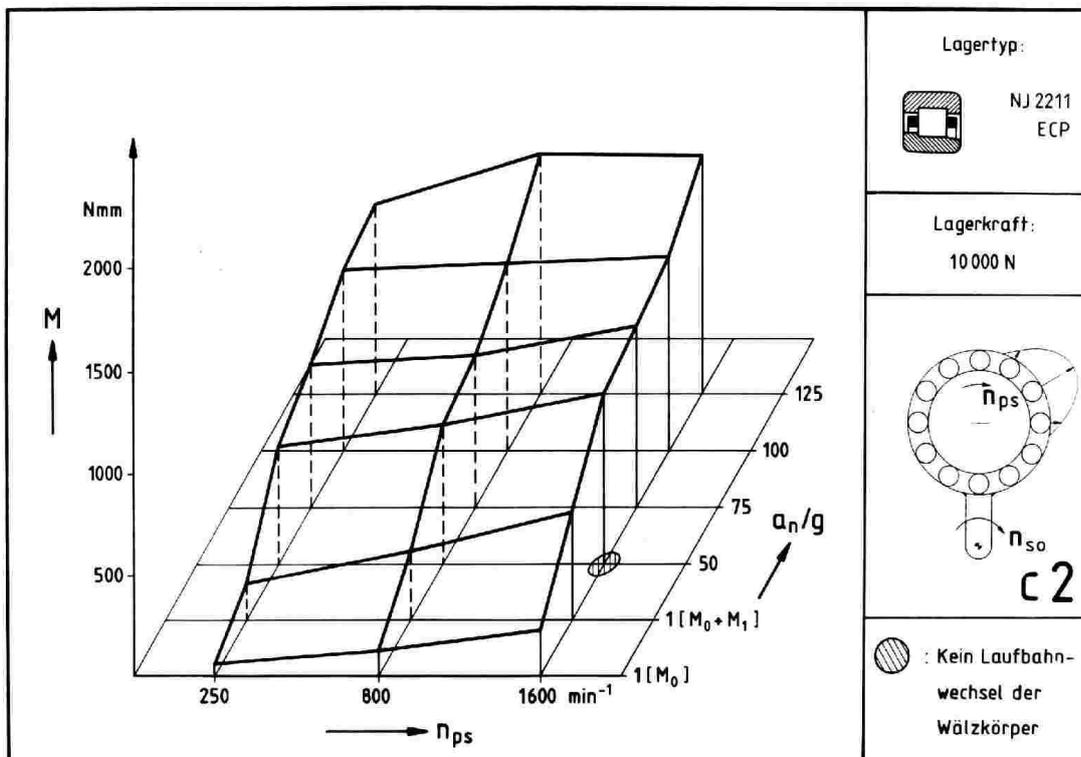


Bild 82

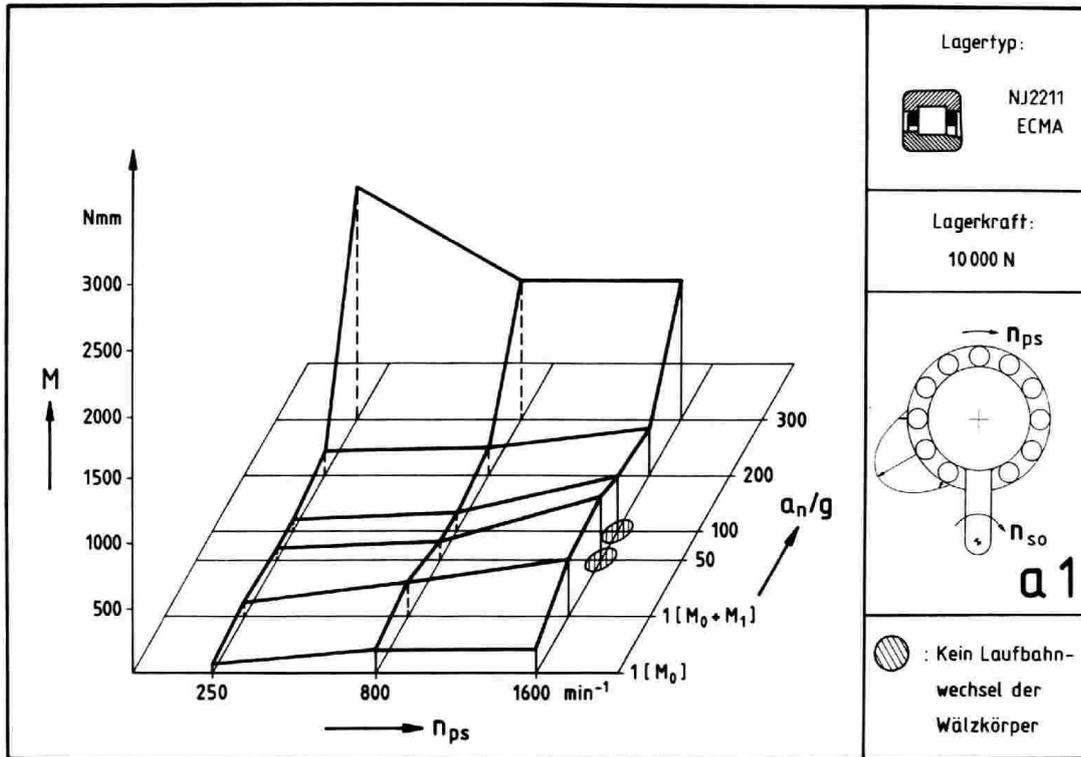


Bild 83

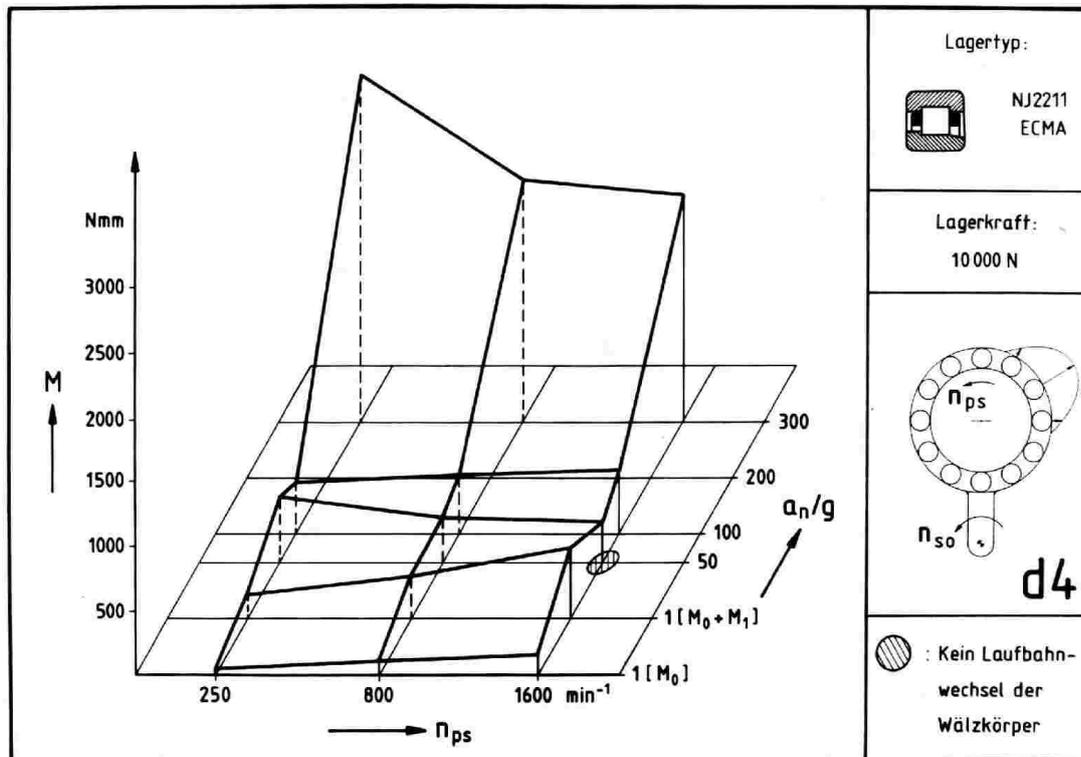


Bild 84

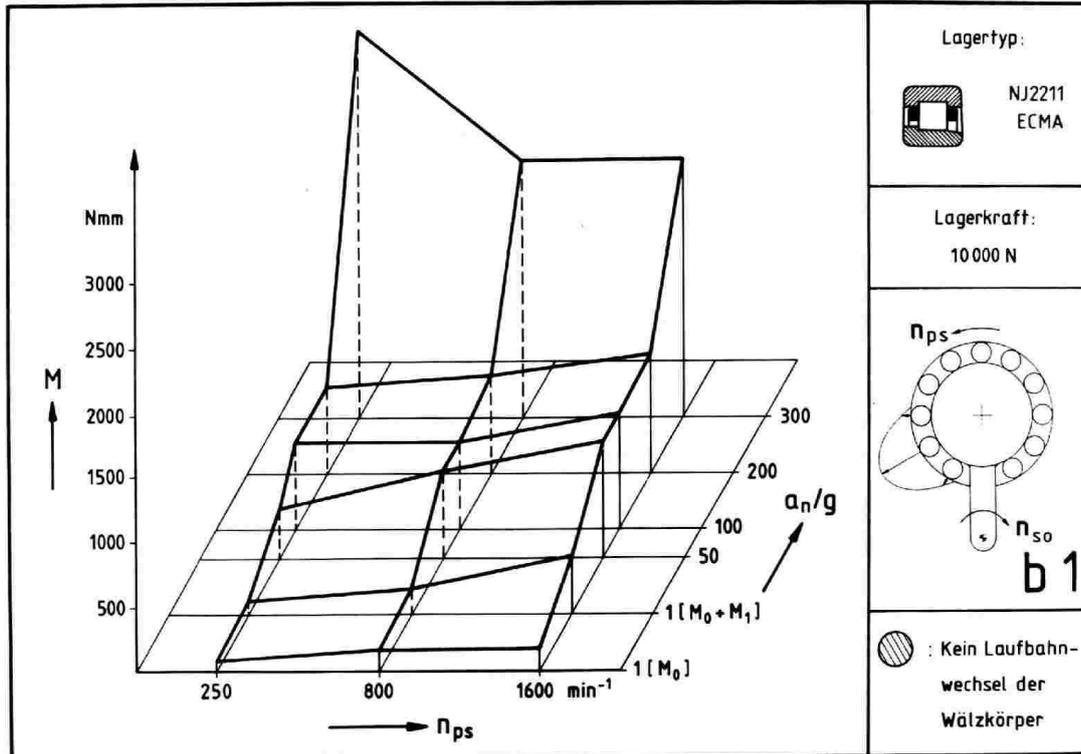


Bild 85

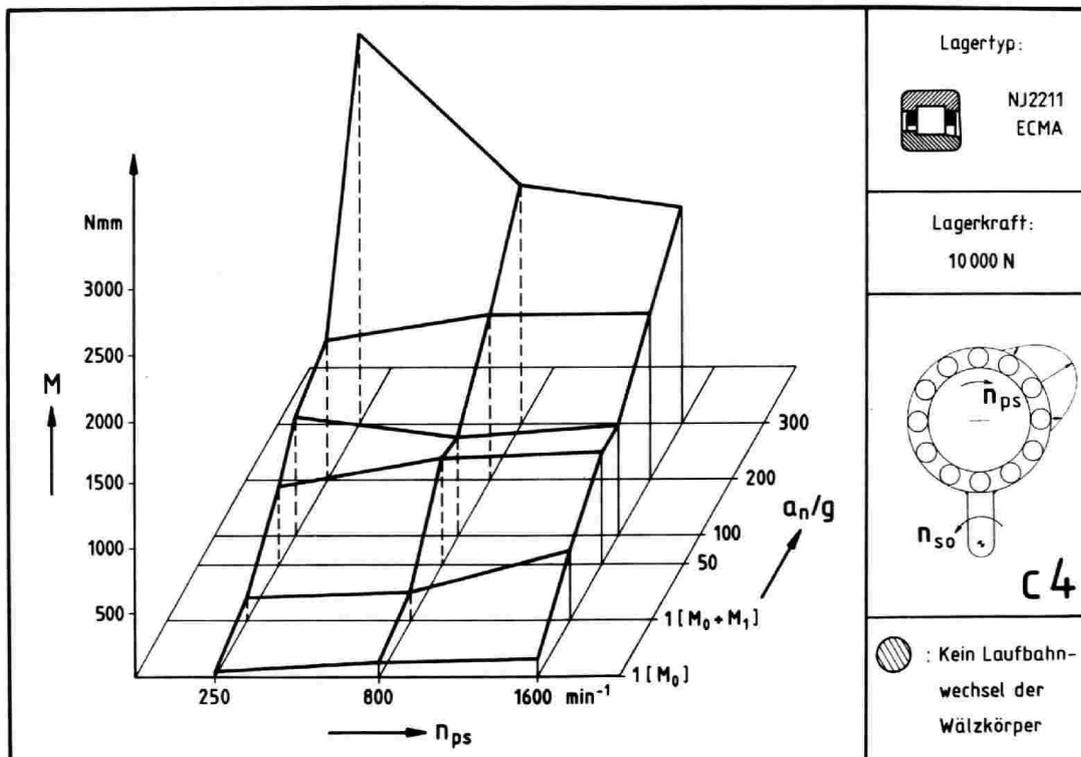


Bild 86

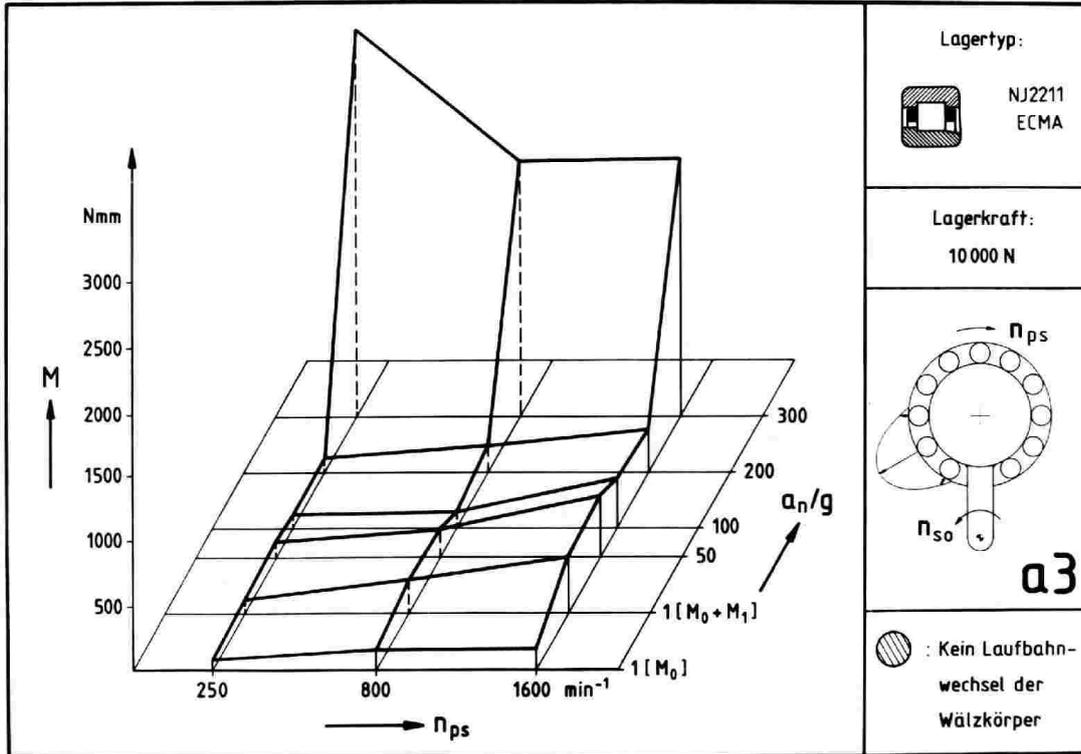


Bild 87

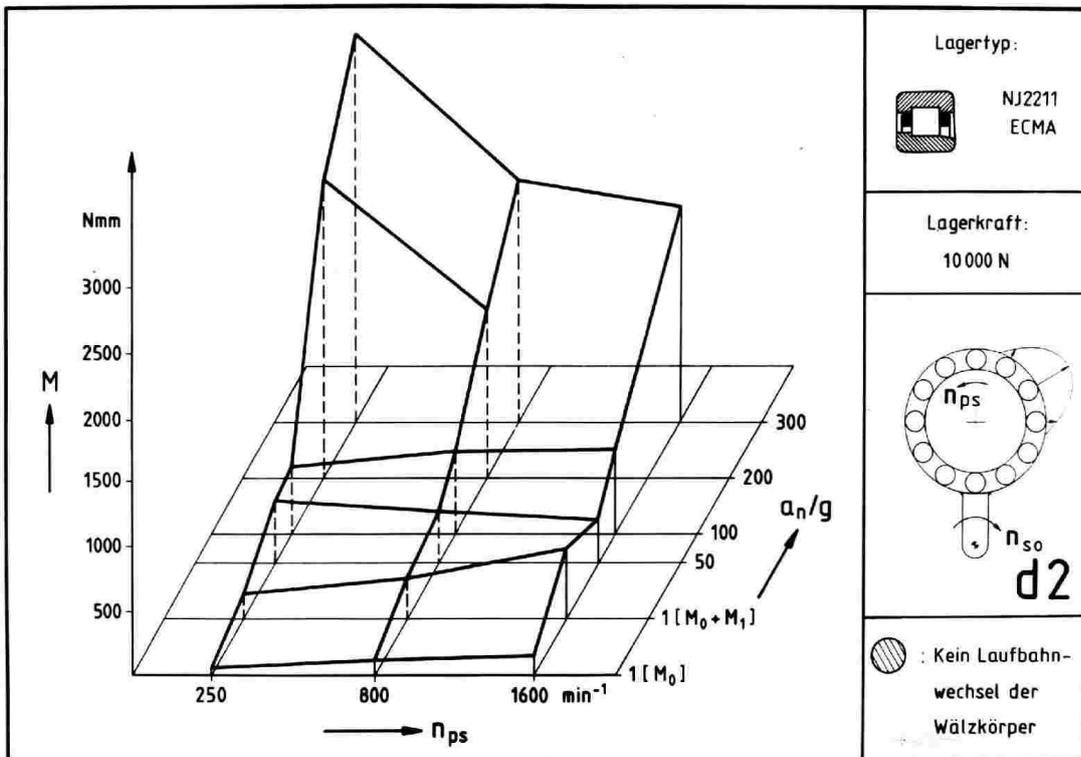


Bild 88

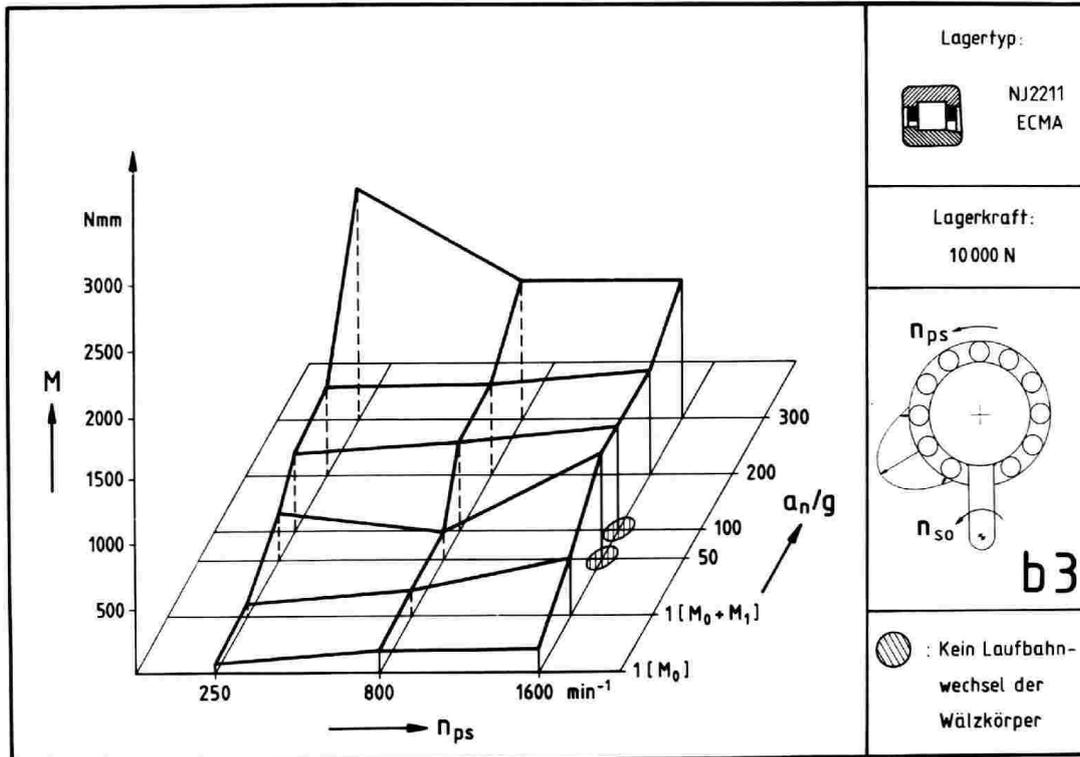


Bild 89

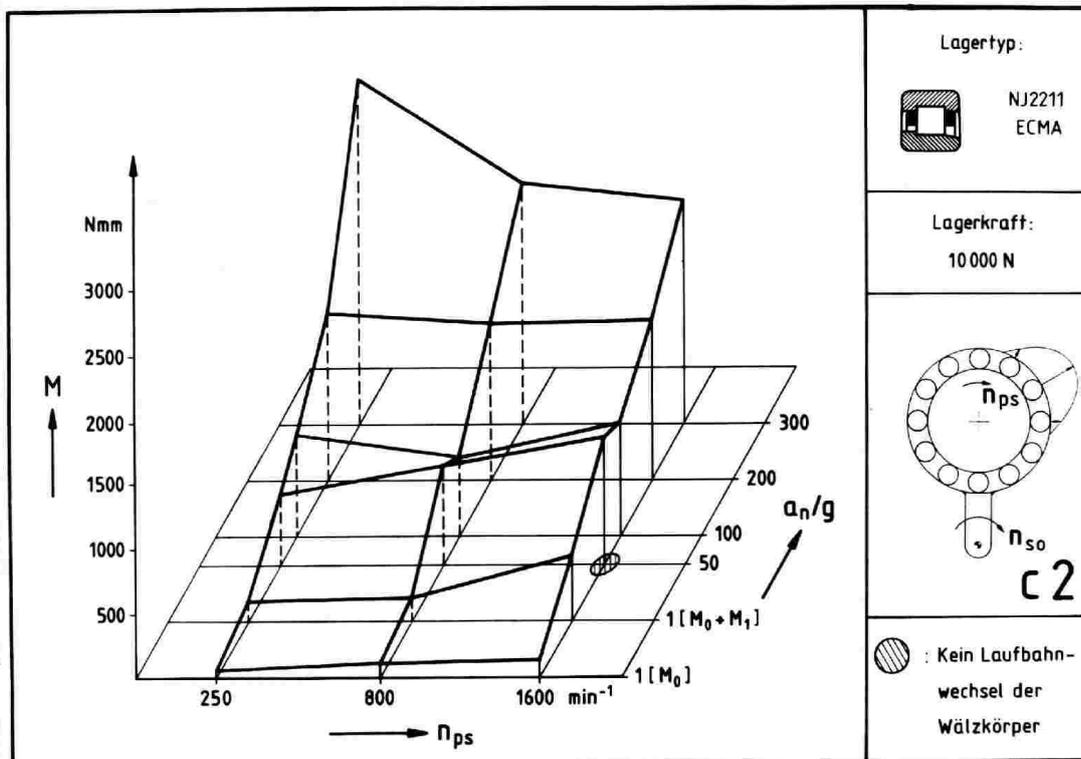


Bild 90

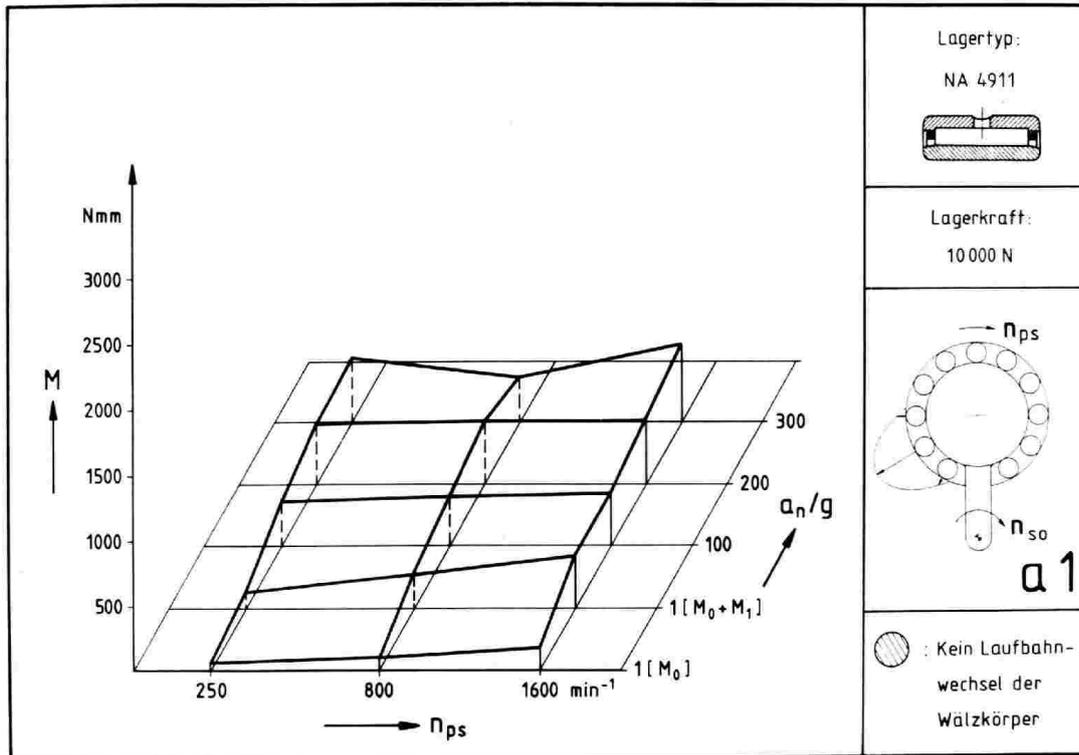


Bild 91

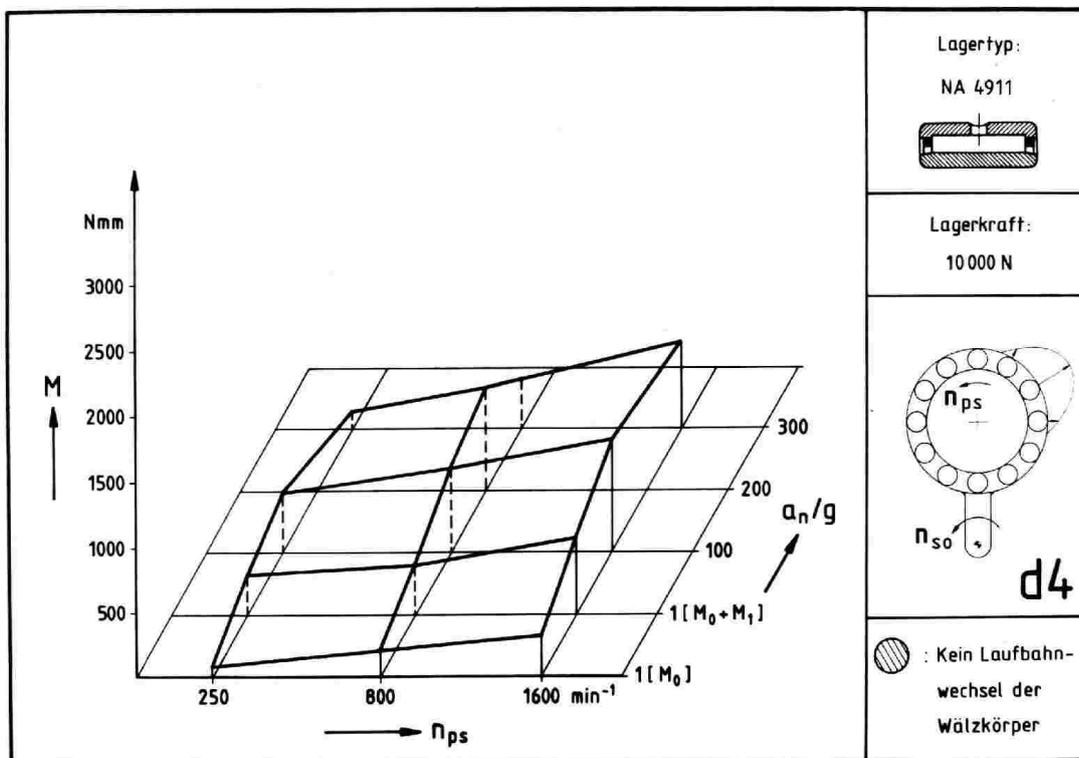


Bild 92

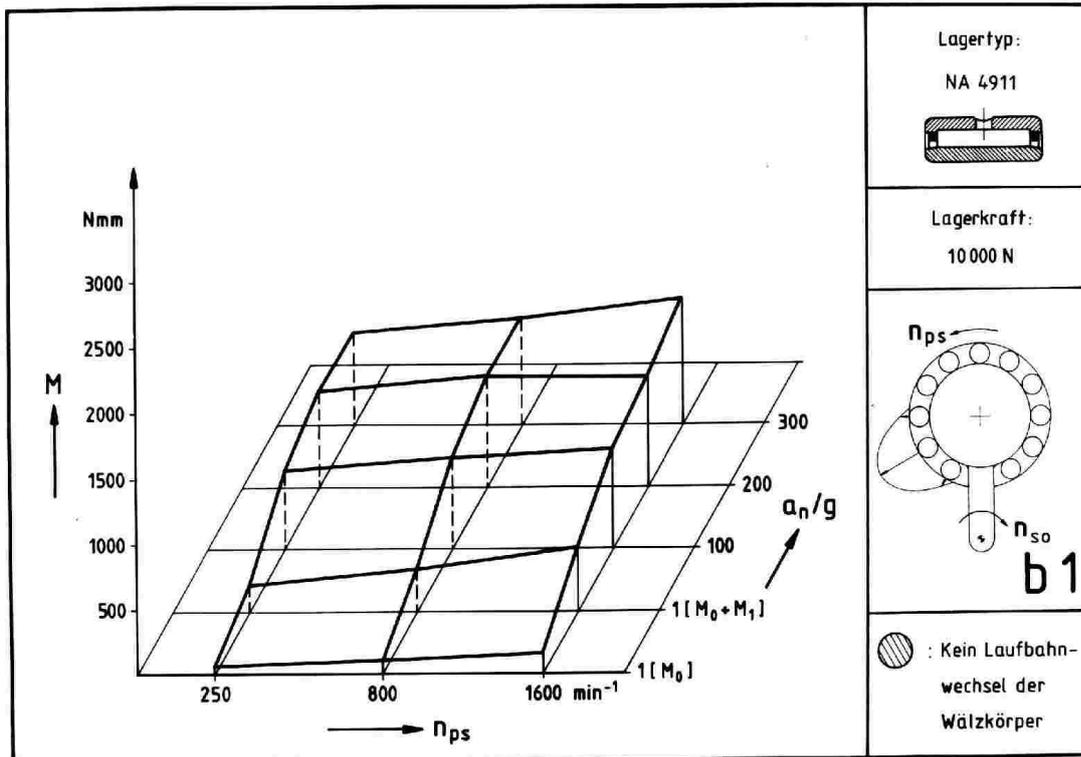


Bild 93

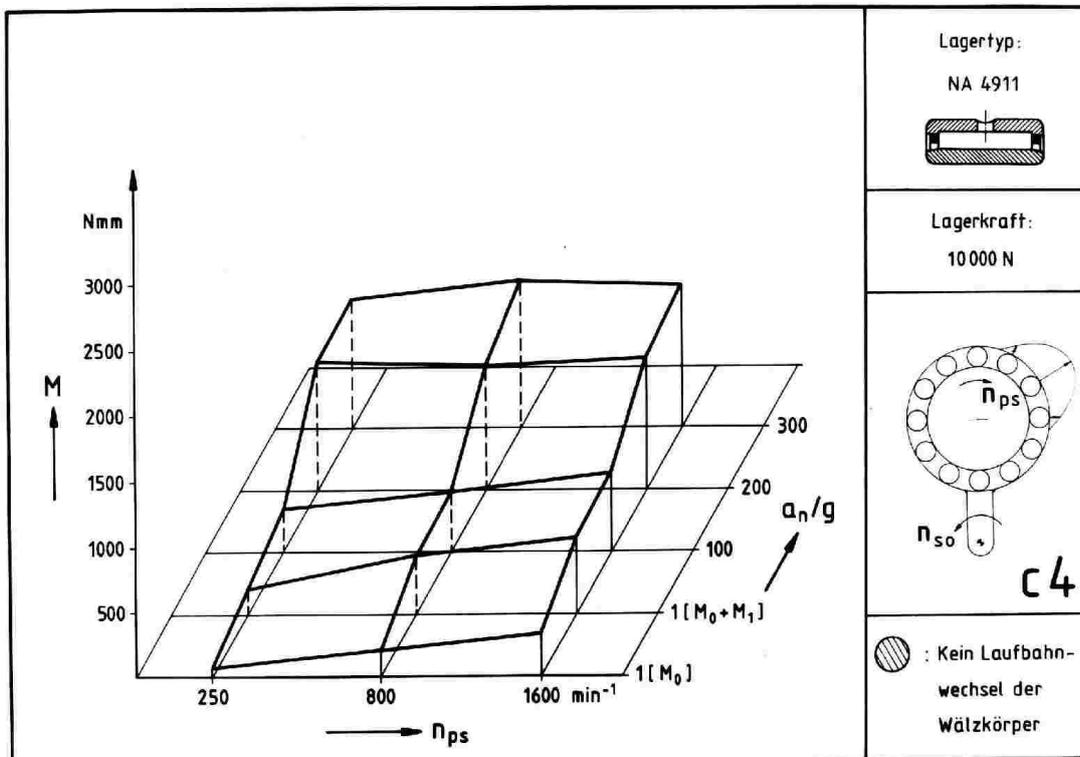


Bild 94

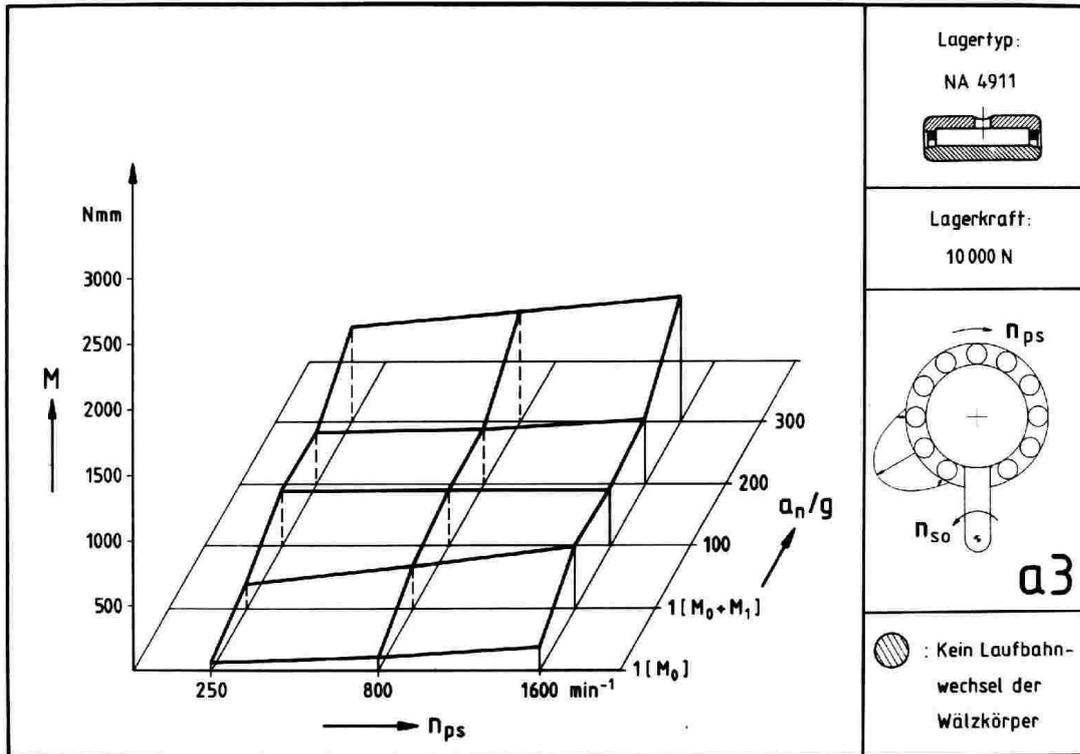


Bild 95

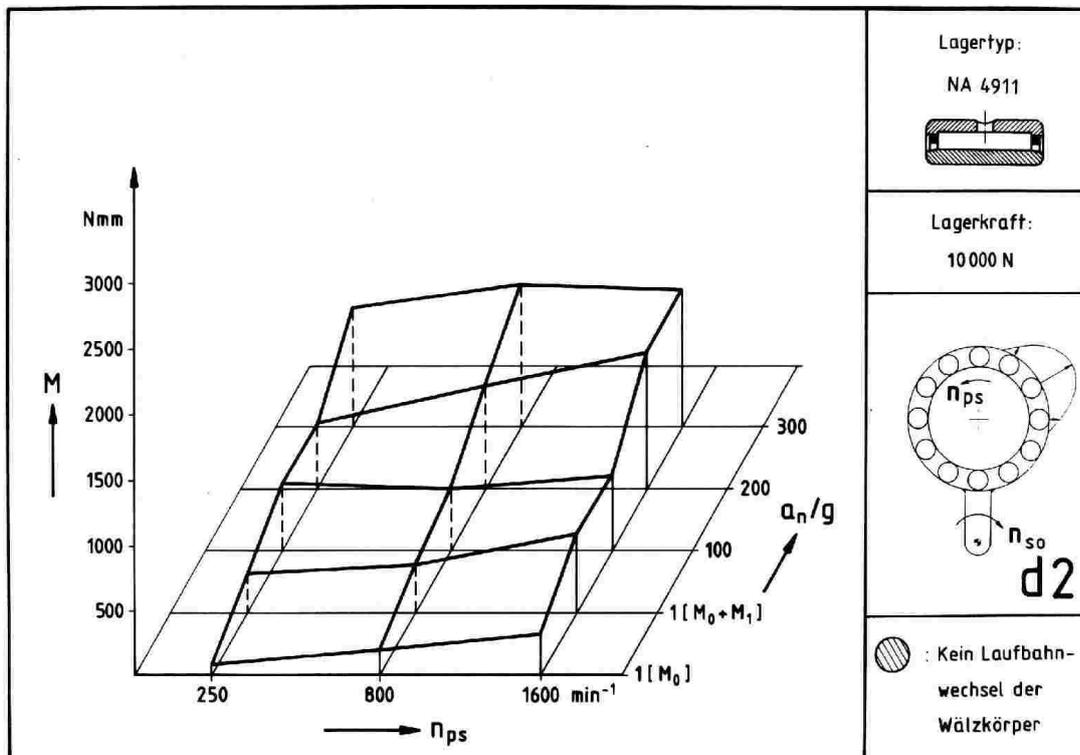


Bild 96

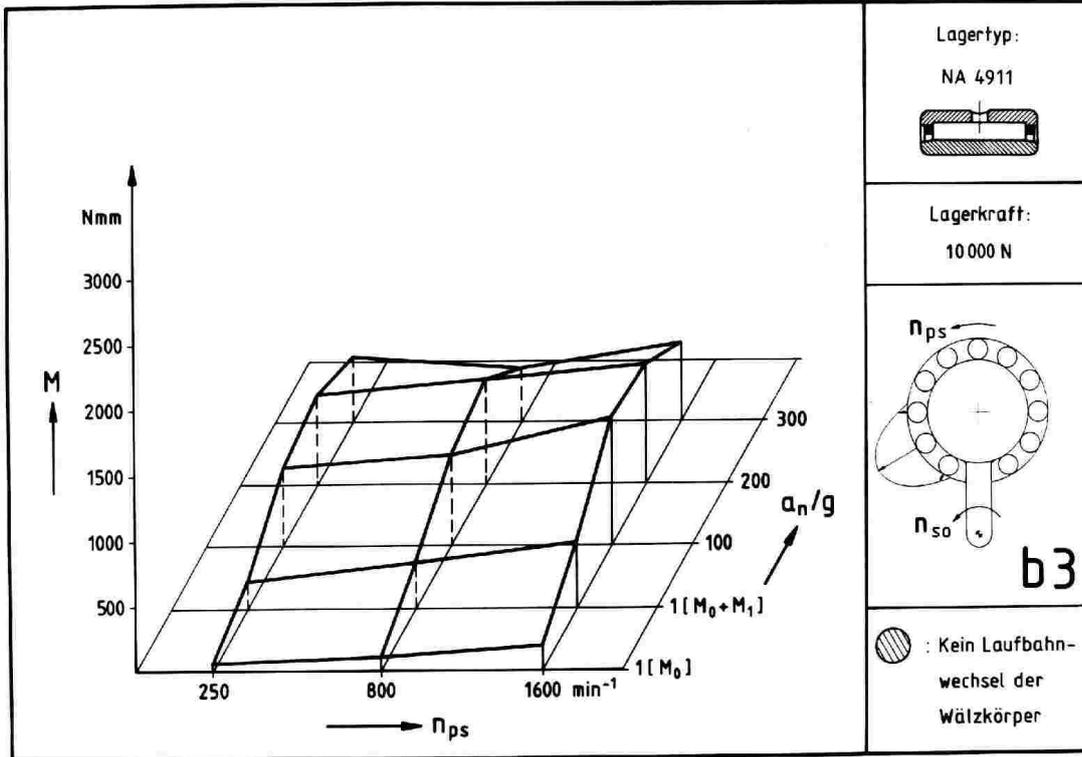


Bild 97

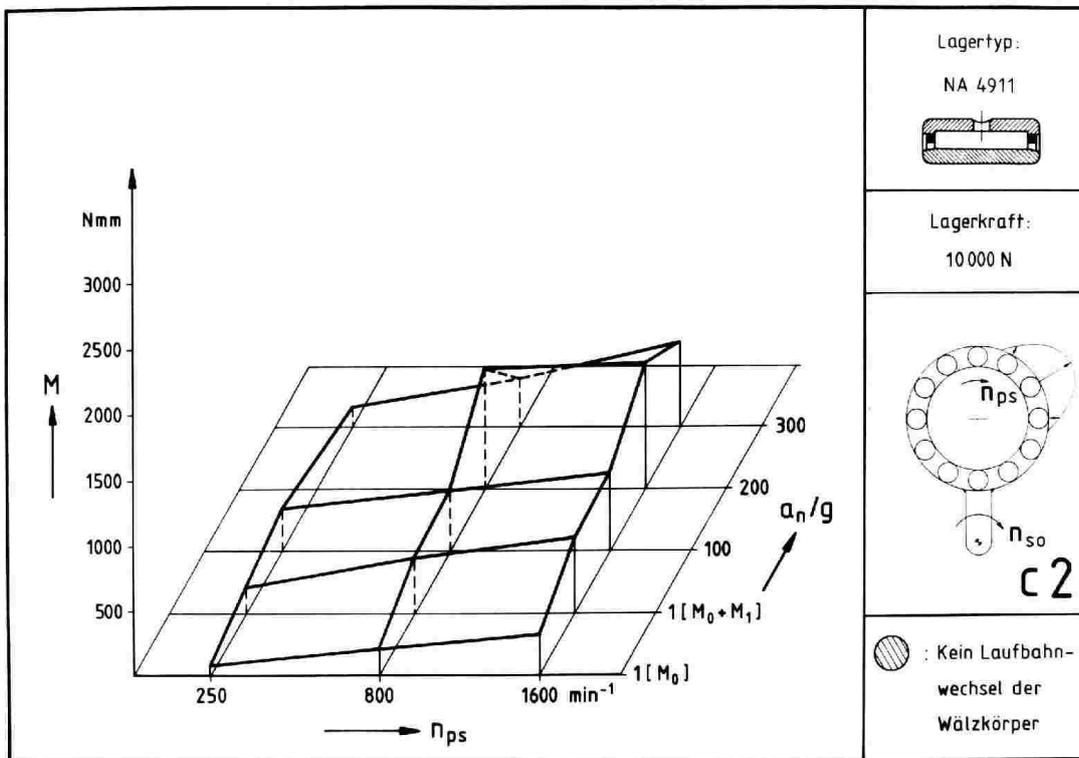


Bild 98

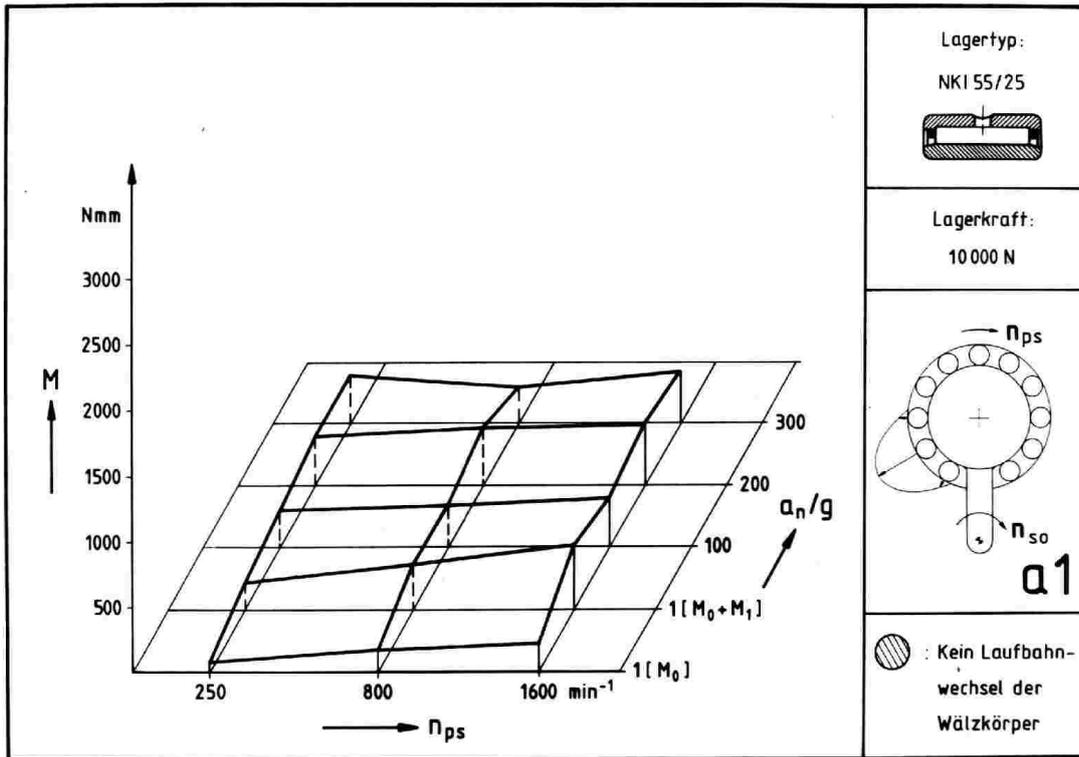


Bild 99

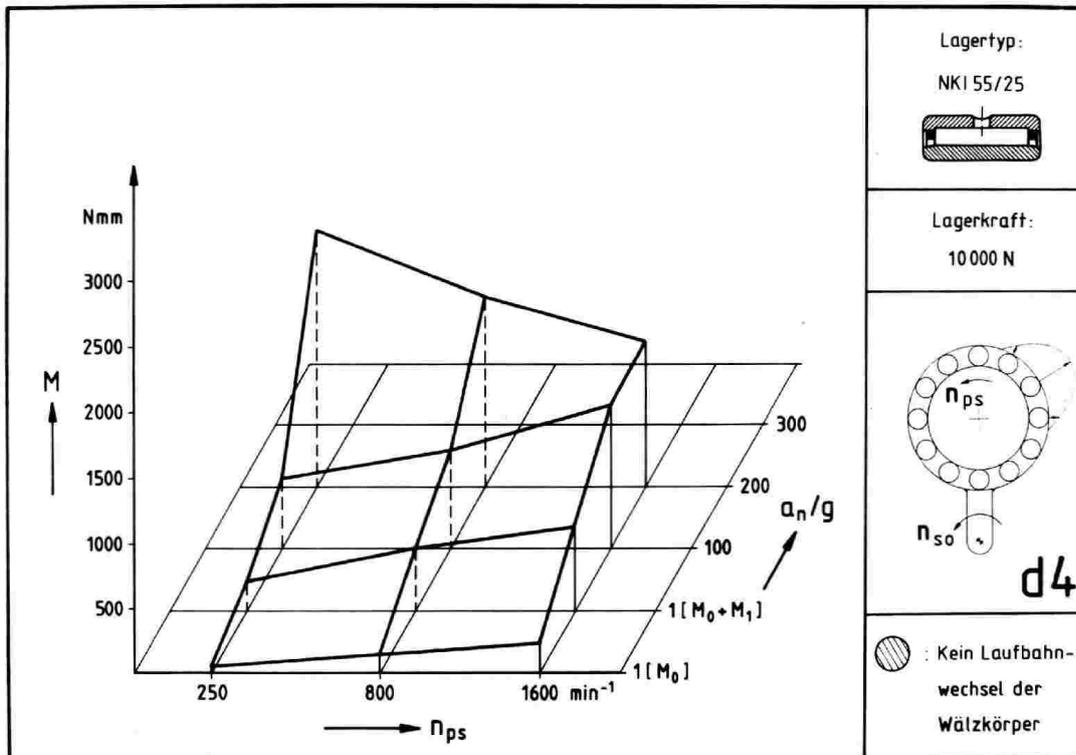


Bild 100

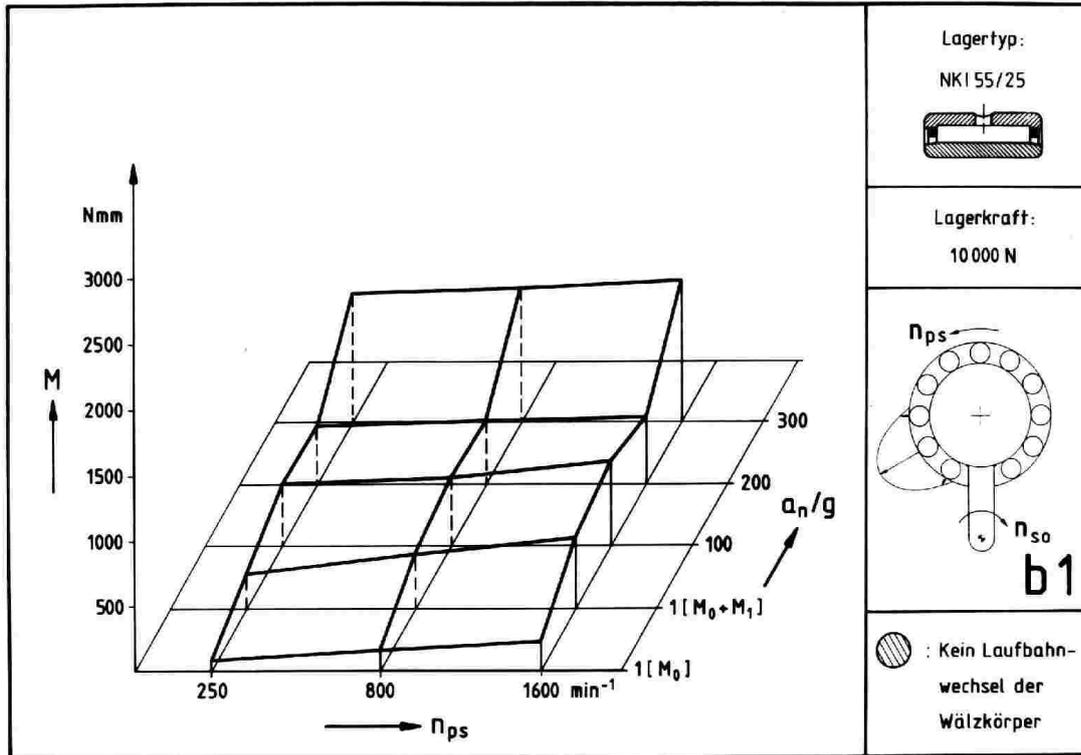


Bild 101

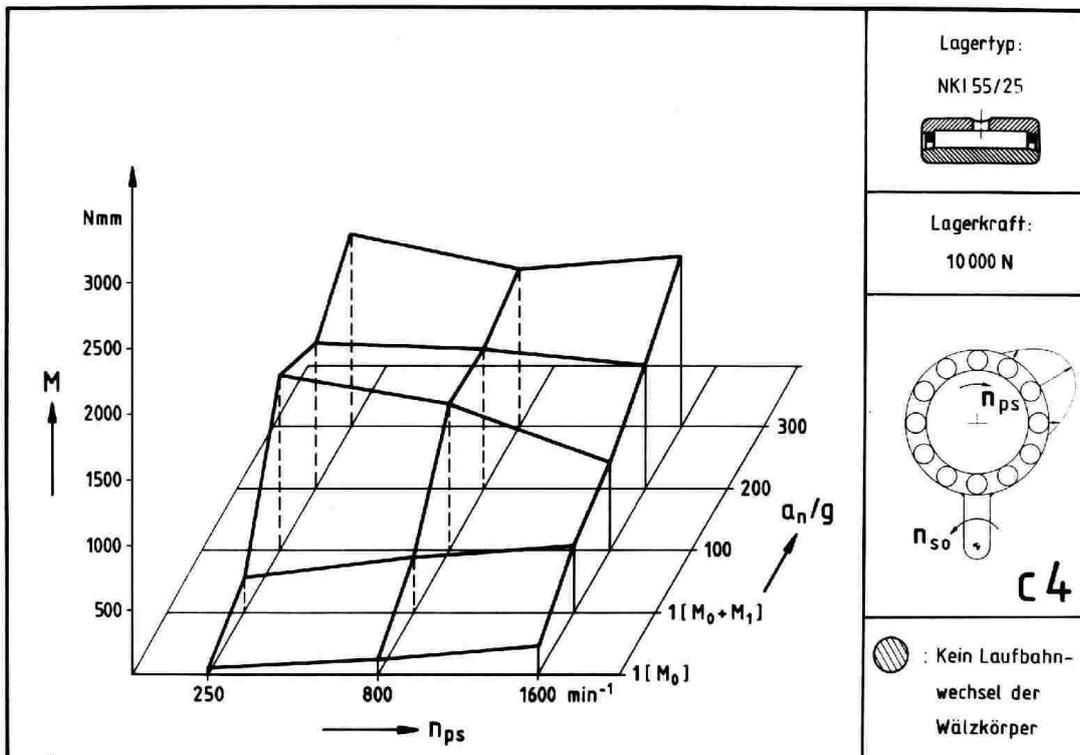


Bild 102

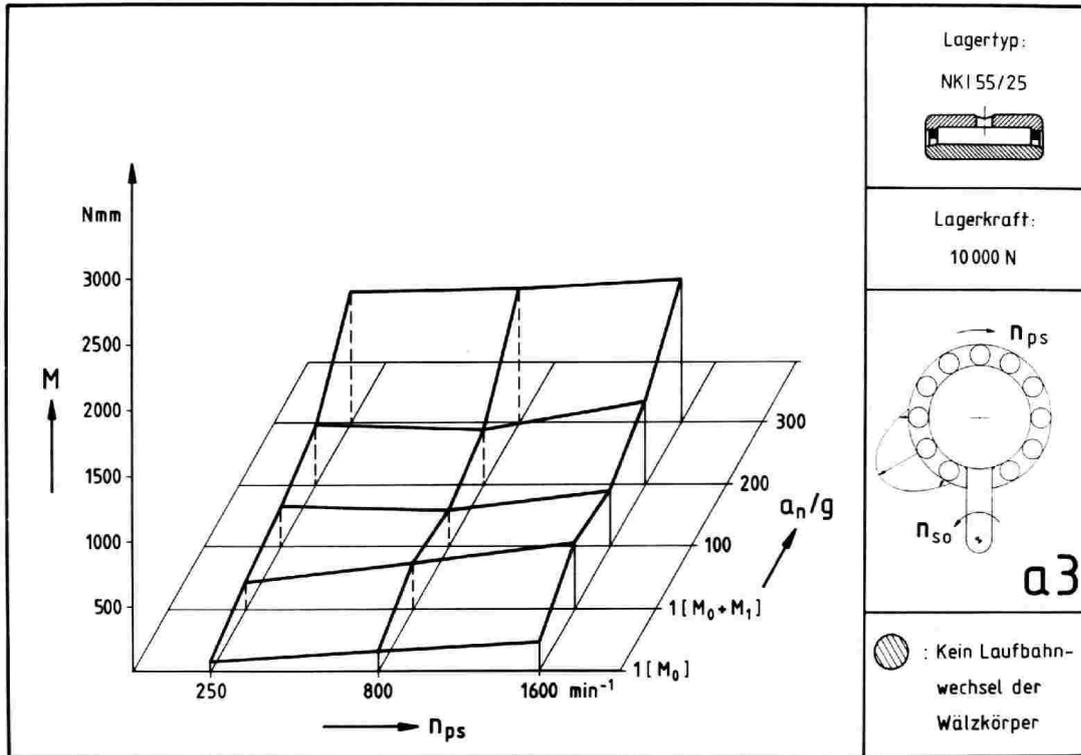


Bild 103

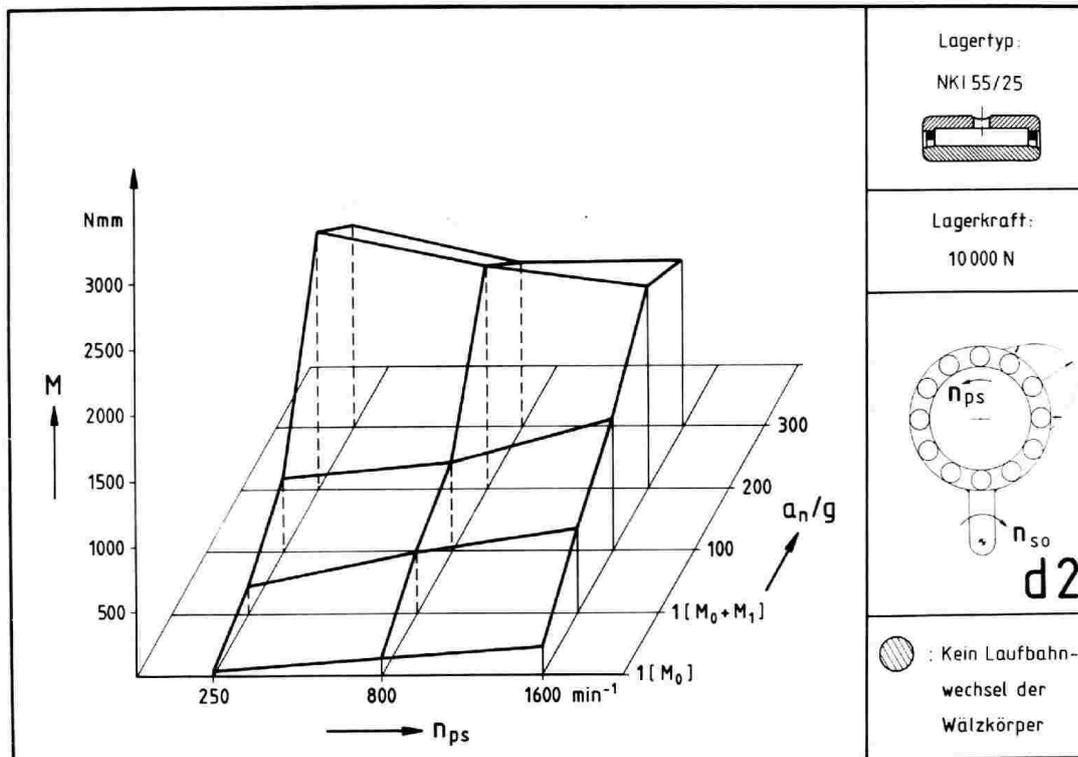


Bild 104

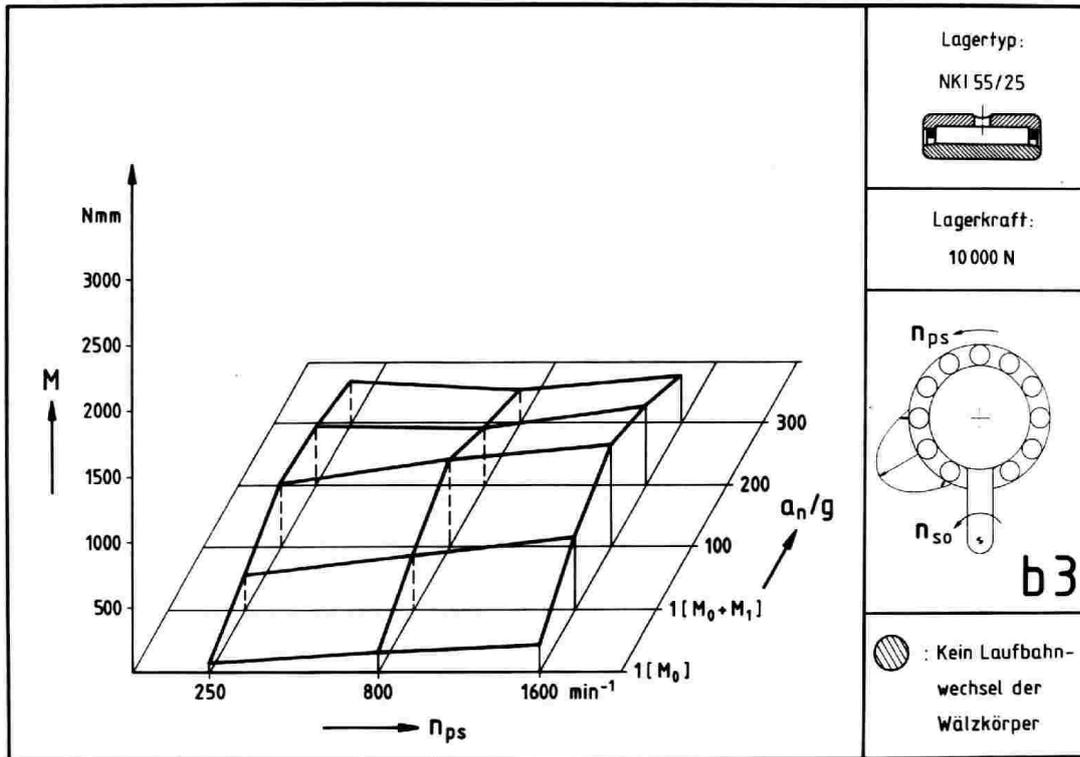


Bild 105

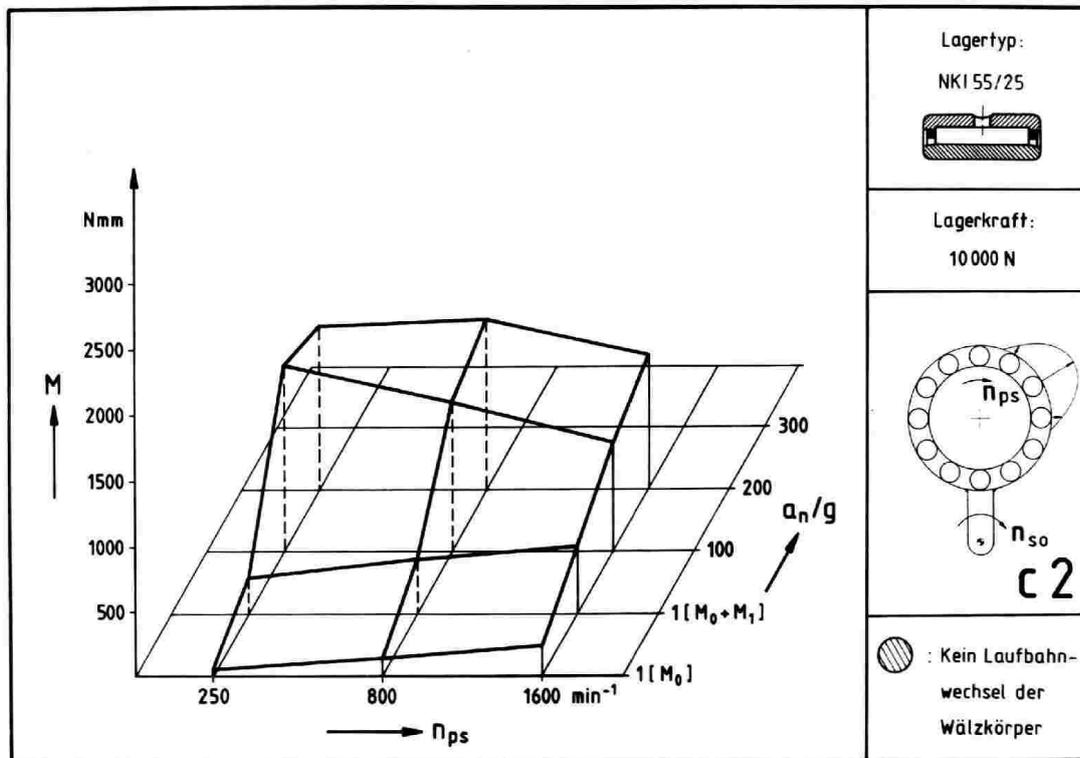


Bild 106

8.4.2 Schlupf. Der Schlupf des Wälzkörperpaketes ist definiert durch

$$s = \frac{\dot{\beta}_m - \dot{\beta}_{id}}{\dot{\beta}_{id}} \quad (270)$$

mit $\dot{\beta}_m$ mittlere gemessene Umlaufgeschwindigkeit
des Wälzkörperpaketes
 $\dot{\beta}_{id}$ theoretische Umlaufgeschwindigkeit
des Wälzkörperpaketes bei idealem Abrollen

Für die Bestimmung der Bezugsgröße $\dot{\beta}_{id}$ werden die Drehzahlen von Sonnenrad und Steg des Prüfgetriebes induktiv gemessen. Außerdem liefern an einem Wälzkörper oder dem Käfig angebrachte Geber die Umlaufgeschwindigkeit des Wälzkörperpaketes.

Lorösch weist in seinen Untersuchungen an Getriebelagerungen [13] auf kritische Schlupfzustände bei geringer Belastung hin. Tafel 2 gibt deshalb die betragsmäßig größten und kleinsten gemessenen Schlupfwerte für die einzelnen Lagertypen an. Die Werte weisen auf ein Abwälzen der Rollkörper in der Lastzone hin und zeigen, daß die Lagern nicht wegen zu kleiner Belastung wie Mehrflächengleitlager umgelaufen sind.

Die einzelnen Lagerbauformen unterscheiden sich im Schlupfverhalten. Während bei dem Nadellager NA4911 der Schlupf in allen Betriebszuständen fast konstant bei ca. -2,8 % liegt, weist das Lager NJ2211 ECMA eine relativ große Streuung der Meßwerte unabhängig von Lagerdrehzahl oder Normalbeschleunigung auf. Dies gilt auch für die Bauform SL18 2211, jedoch ist hier der Grund in dem kleinen untersuchten Bereich von $a_n = 12.5g$ bis $a_n = 50g$ zu suchen. Dagegen zeigt das Lager NJ2211 ECP eine deutliche Abhängigkeit des Schlupfes von der Führungsnormalsbeschleunigung. Bei umlaufendem Außenring steigt hier der Schlupf mit wachsender Stegdrehzahl, während er bei umlaufendem Innenring sinkt. Dabei können Vorzeichenwechsel von positiven zu negativen Werten und umgekehrt vorkommen.

Tafel 2: Angaben zum Schlupf

Lager	$ s_{min} $	$ s_{max} $
SL18 2211	0.005 %	0.360 %
NJ2211 ECP	0.090 %	1.600 %
NJ2211 ECMA	0.009 %	1.600 %
NA4911	2.500 %	3.200 %
NKI 55/25	0.006 %	0.420 %

Die Lagerdrehrichtung hat bei allen untersuchten Zylinderrollenlagern einen deutlichen Einfluß auf das Vorzeichen des Schlupfes. So beobachtet man bei dem Einlaufen der Wälzkörper von der stegabgewandten Seite in die Lastzone (Betriebsfälle b1, c4, b3, c2) bis $a_n = 100g$ ein Voreilen und in den übrigen Fällen ein Zurückbleiben des Wälzkörperpaketes. Bei Führungsnormalbeschleunigung über $100g$ stellt sich bei umlaufendem Innenring positiver und bei umlaufendem Außenring negativer Schlupf ein.

Die Tafeln 3 bis 7 enthalten alle an den verschiedenen Lagertypen gemessenen Schlupfwerte.

Tafel 3: Gemessener Schlupf des Lagers SL18 2211
 Bezeichnung der Betriebsfälle nach *Bild 3*
 Angaben für Schlupf in %
 0 g (ohne Lagerbelastung), A 1g, B 12.5g, C 25g, D 50g

	0[UA]	0[UI]	A[UA]	A[UI]	B[UA]	B[UI]	C[UA]	C[UI]	D[UA]	D[UI]
250			a1	d4	a1	d4	a1	d4	a1	d4
	+0.195	+0.184	+0.046	—	-0.159	-0.195	-0.279	+0.111	-0.324	+0.111
			b1	c4	b1	c4	b1	c4	b1	c4
	—	—	+0.282	—	+0.174	+0.145	+0.176	+0.148	+0.201	+0.155
			a3	d2	a3	d2	a3	d2	a3	d2
	—	—	—	+0.183	-0.243	-0.096	-0.279	+0.061	-0.253	+0.133
		b3	c2	b3	c2	b3	c2	b3	c2	
		—	+0.105	+0.216	+0.146	+0.194	+0.154	+0.233	+0.096	
800			a1	d4	a1	d4	a1	d4	a1	d4
	+38.596	-0.060	+0.128	—	-0.208	-0.171	-0.255	-0.155	—	—
			b1	c4	b1	c4	b1	c4	b1	c4
	—	—	+0.231	—	+0.218	+0.150	+0.205	+0.145	—	—
			a3	d2	a3	d2	a3	d2	a3	d2
	—	—	—	+0.124	-0.189	-0.164	-0.245	-0.088	—	—
		b3	c2	b3	c2	b3	c2	b3	c2	
		—	-0.273	+0.217	+0.148	+0.195	+0.123	—	—	
1600			a1	d4	a1	d4	a1	d4	a1	d4
	+70.094	-0.493	+0.208	—	-0.049	-0.164	-0.172	-0.153	—	—
			b1	c4	b1	c4	b1	c4	b1	c4
	—	—	+0.215	—	+0.208	+0.127	+0.204	+0.124	—	—
			a3	d2	a3	d2	a3	d2	a3	d2
	—	—	—	-0.272	-0.143	-0.160	-0.212	-0.156	—	—
		b3	c2	b3	c2	b3	c2	b3	c2	
		—	-0.167	+0.218	+0.133	+0.212	+0.143	—	—	

Tafel 4: Gemessener Schlupf des Lagers NJ2211 ECP
 Bezeichnung der Betriebsfälle nach Bild 3. Angaben für Schlupf
 in %. 0 1g (ohne Lagerbelastung),
 A 1g, D 50g, E 75g, F 100g, G 125g

	0[UA]	0[UI]	A[UA]	A[UI]	D[UA]	D[UI]	E[UA]	E[UI]	F[UA]	F[UI]	G[UA]	G[UI]
250			a1	d4								
	-0.028	+0.656	+0.589	—	-1.030	-0.342	-1.227	-0.262	-1.237	+0.748	-1.318	0.271
			b1	c4								
	—	—	-0.440	—	+0.612	+0.683	+0.735	+0.928	+0.684	+0.935	+0.641	+1.032
			a3	d2								
	—	—	—	-0.306	-1.024	-0.326	-1.266	-0.241	-1.259	-0.093	-1.316	+0.335
		b3	c2									
			+0.392	+0.722	+0.719	+0.730	+0.816	-0.116	+0.984	+0.640	+1.013	
800			a1	d4								
	+51.483	-36.94	+0.557	—	-1.088	+0.651	-1.258	-0.408	-1.363	-0.163	-1.439	+0.231
			b1	c4								
	—	—	+0.444	—	+0.640	+0.769	+0.716	+0.913	+0.645	+1.008	+0.562	+1.098
			a3	d2								
	—	—	—	-0.401	-1.092	-0.340	-1.270	-0.364	-1.388	-0.090	-1.433	+0.241
		b3	c2									
			+0.034	-0.536	+0.727	+0.722	+0.935	+0.681	+0.979	+0.625	+1.103	
1600			a1	d4								
	+71.714	-55.82	+0.574	—	-1.081	-0.388	-1.272	-0.413	-1.429	-0.204	-1.587	+0.193
			b1	c4								
	—	—	+0.526	—	+0.635	+0.762	+0.664	0.912	+0.607	+1.020	+0.445	+1.123
			a3	d2								
	—	—	—	-0.321	-1.126	-0.401	-1.319	-0.324	-1.444	-0.086	-1.618	+0.247
		b3	c2									
			-0.182	+0.657	+0.727	+0.705	+0.890	+0.657	+0.997	+0.523	+1.096	

Tafel 5: Gemessener Schlupf des Lagers NJ2211 ECMA
 Bezeichnung der Betriebsfälle nach *Bild 3*. Angaben für Schlupf
 in %. 0 1g (ohne Lagerbelastung)
 A 1g, D 50g, F 100g, H 200g, I 300g

	0[UA]	0[UI]	A[UA]	A[UI]	D[UA]	D[UI]	F[UA]	F[UI]	H[UA]	H[UI]	I[UA]	I[UI]
250			a1	d4								
	+11.360	-0.994	-0.272	—	—	-0.181	-0.895	-0.978	-0.851	+1.406	—	—
			b1	c4								
	—	—	+0.724	—	-0.016	+0.594	-0.274	+1.293	-0.827	+1.485	—	—
			a3	d2								
	—	—	—	+0.118	-0.820	-0.200	-0.981	-1.072	-0.843	+1.601	—	+0.675
		b3	c2	b3	c2	b3	c2	b3	c2	b3	c2	
		—	-0.272	-0.014	—	-0.227	+1.356	-0.869	+1.424	—	+0.597	
800			a1	d4								
	+50.236	-31.567	+0.785	—	-0.863	-0.186	-0.966	-1.015	-0.962	+1.429	—	—
			b1	c4								
	—	—	+0.724	—	+0.009	+0.687	-0.245	+1.365	-0.946	+1.404	—	—
			a3	d2								
	—	—	—	+0.118	-0.838	-0.251	-0.952	-1.025	-1.016	+1.461	—	+0.374
		b3	c2	b3	c2	b3	c2	b3	c2	b3	c2	
		—	-0.572	+0.018	+0.658	-0.230	+1.349	-0.922	+1.403	—	+0.332	
1600			a1	d4								
	+67.192	-59.910	+0.977	—	-0.767	-0.295	-0.949	-1.028	-0.938	+1.409	—	—
			b1	c4								
	—	—	+0.813	—	+0.031	+0.739	-0.259	+1.361	-0.997	+1.382	—	—
			a3	d2								
	—	—	—	-0.830	-0.813	-0.269	-0.963	-0.999	-1.048	+1.326	—	+0.530
		b3	c2	b3	c2	b3	c2	b3	c2	b3	c2	
		—	-1.092	+0.053	+0.713	-0.234	+1.333	-0.972	+0.977	—	+0.446	

Tafel 6: Gemessener Schlupf des Lagers NA4911
 Bezeichnung der Betriebsfälle nach Bild 3. Angaben für Schlupf
 in %. 0 1g (ohne Lagerbelastung)
 A 1g, F 100g, H 200g, I 300g

	0[UA]	0[UI]	A[UA]	A[UI]	F[UA]	F[UI]	H[UA]	H[UI]	I[UA]	I[UI]
250			a1	d4	a1	d4	a1	d4	a1	d4
	—	-2.981	—	—	—	-2.956	—	-2.856	—	—
			b1	c4	b1	c4	b1	c4	b1	c4
	—	—	—	—	—	-2.546	—	-2.913	—	—
			a3	d2	a3	d2	a3	d2	a3	d2
	—	—	—	-2.925	—	-3.145	—	-2.821	—	-2.864
		b3	c2	b3	c2	b3	c2	b3	c2	
		—	-2.870	—	-2.523	—	-2.915	—	-2.893	
800			a1	d4	a1	d4	a1	d4	a1	d4
	—	-2.927	—	—	—	-3.014	—	-2.843	—	—
			b1	c4	b1	c4	b1	c4	b1	c4
	—	—	—	—	—	-2.534	—	-2.827	—	—
			a3	d2	a3	d2	a3	d2	a3	d2
	—	—	—	-2.923	—	-3.045	—	-2.817	—	—
		b3	c2	b3	c2	b3	c2	b3	c2	
		—	-2.910	—	-2.558	—	-2.850	—	—	
1600			a1	d4	a1	d4	a1	d4	a1	d4
	—	-2.912	—	—	—	-2.916	—	-2.845	—	—
			b1	c4	b1	c4	b1	c4	b1	c4
	—	—	—	—	—	-2.894	—	-2.891	—	—
			a3	d2	a3	d2	a3	d2	a3	d2
	—	—	—	-2.915	—	-2.947	—	-2.864	—	—
		b3	c2	b3	c2	b3	c2	b3	c2	
		—	-2.910	—	-2.816	—	-2.889	—	—	

Tafel 7: Gemessener Schlupf des Lagers NKI 55/25

Bezeichnung der Betriebsfälle nach Bild 3.

Angaben für Schlupf in %.

0 1g (ohne Lagerbelastung) A 1g F 100g H 200g I 300g

	0[UA]	0[UI]	A[UA]	A[UI]	F[UA]	F[UI]	H[UA]	H[UI]	I[UA]	I[UI]
250			a1	d4	a1	d4	a1	d4	a1	d4
	—	+0.059	—	—	—	-0.006	—	—	—	—
			b1	c4	b1	c4	b1	c4	b1	c4
	—	—	—	—	—	+0.252	—	—	—	—
			a3	d2	a3	d2	a3	d2	a3	d2
	—	—	—	-0.014	—	-0.076	—	+0.421	—	—
		b3	c2	b3	c2	b3	c2	b3	c2	
		—	-0.037	—	+0.234	—	+0.388	—	—	
800			a1	d4	a1	d4	a1	d4	a1	d4
	—	-0.542	—	—	—	+0.105	—	—	—	—
			b1	c4	b1	c4	b1	c4	b1	c4
	—	—	—	—	—	+0.300	—	—	—	—
			a3	d2	a3	d2	a3	d2	a3	d2
	—	—	—	-0.172	—	+0.056	—	—	—	—
		b3	c2	b3	c2	b3	c2	b3	c2	
		—	-0.292	—	+0.293	—	—	—	—	
1600			a1	d4	a1	d4	a1	d4	a1	d4
	—	-2.319	—	—	—	+0.101	—	—	—	—
			b1	c4	b1	c4	b1	c4	b1	c4
	—	—	—	—	—	+0.362	—	—	—	—
			a3	d2	a3	d2	a3	d2	a3	d2
	—	—	—	-0.277	—	+0.118	—	—	—	—
		b3	c2	b3	c2	b3	c2	b3	c2	
		—	-0.387	—	+0.331	—	—	—	—	

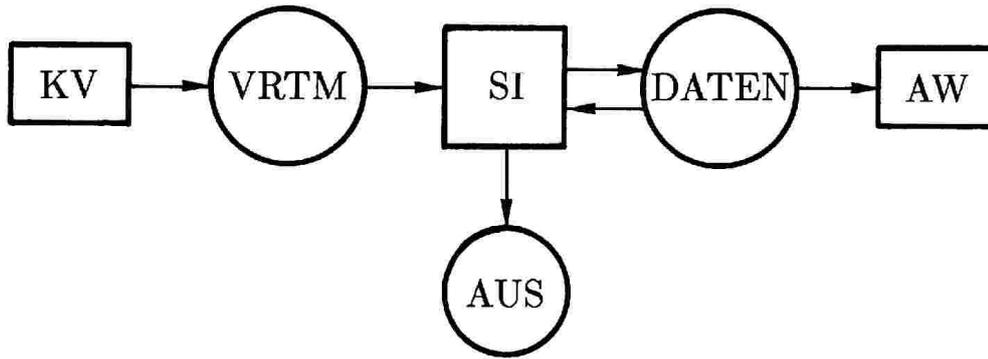


Bild 107: Datenfluß zwischen den Programmen von RLSI

9 EDV-Programmsystem RLSI

Das Programmsystem RLSI (Rollenlager-Simulation) besteht aus drei Einzelprogrammen, die über Softwareschnittstellen miteinander kommunizieren. Das eigentliche Simulationsprogramm SI (Simulationsprogramm) berechnet die Lagerdynamik und legt die Ergebnisse als Zeitverläufe oder als Mittelwerte in Dateien ab. Für die Erfassung von Käfigverformungen stellt das Programm KV (Käfigverformung) dem Simulationsprogramm nach Durchführung einer Finite-Elemente-Rechnung eine Datei mit den Einflußzahlen für den betreffenden Käfig zur Verfügung. Schließlich ermöglicht das Auswertungsprogramm AW (Auswertung) eine schnelle und einfache Analyse der berechneten Ergebnisse.

Dem Datentransfer von KV nach SI dient die Datei VRTM, die neben den Einflußzahlen auch Geometriedaten des Käfigs enthält. Das Simulationsprogramm SI legt während der Rechnung ständig Zwischenergebnisse in der Datei DATEN ab, um damit das Programm restart-fähig zu machen und schließlich die Auswertung mit dem Graphikprogramm AW zu ermöglichen. Es erzeugt außerdem ein Protokoll der Eingabedaten und der gemittelten Ergebnisse auf der Datei AUS. *Bild 107* verdeutlicht noch einmal den Zusammenhang. Um die Dateistruktur gegebenenfalls schnell ändern zu können, laufen bei SI und AW alle Lese- und Schreibvorgänge mit externen Dateien über ein einziges Unterprogramm (DATEI).

Alle Programme sind in der Programmiersprache FORTRAN Version 5 nach DIN 66027 bzw. ANSI X3.9-1978 formuliert. AW ruft für die graphische

Ausgabe zusätzlich Unterprogramme des NAG¹⁾ Graphical Supplement auf.

9.1 Lager - Simulationsprogramm SI

Das Aufstellen des dynamischen Gleichgewichtes von Wälzkörpern und Käfig unter Berücksichtigung der Massen - und Schmierspaltkräfte führt auf ein nichtlineares Differentialgleichungssystem 2. Ordnung, das den kinematischen Zustand des Lagers eindeutig beschreibt. Die Lösung erfolgt nach Überführung in ein nichtlineares Differentialgleichungssystem 1. Ordnung durch numerische Integration mit Hilfe des Runge-Kutta-Verfahrens. Dazu werden zunächst abhängig vom Lagertyp und Betriebszustand Anfangswerte für die $5n_w + 6$ Unbekannten (bei n_w Wälzkörpern) festgelegt. *Bild 108* erläutert den weiteren Verlauf der Rechnung. Für jedes betrachtete Zeitintervall werden die Schmierspalthöhen und -geschwindigkeiten in den Kontakten zwischen Wälzkörpern, Käfig und Laufbahnen berechnet. Diese Kenngrößen liefern mit den EHD-Näherungsgleichungen die Normal- und Reibkräfte in den Schmierspalten. Anschließend ermittelt man die daraus resultierende elastische Verformung des Käfigs sowie die neuen Lagen und Geschwindigkeiten von Wälzkörpern und Käfigstegen für das folgende Zeitintervall. Diese Schritte sind bis zum Erreichen eines quasistationären Zustandes zu wiederholen. Das Reibmoment des Lagers ergibt sich aus der Summe der von den Wälzkörpern und gegebenenfalls dem bordgeführten Käfig auf den drehenden Lagerring wirkenden Reibkräfte.

9.1.1 Programmablauf. *Bild 109* verdeutlicht den modularen Aufbau des Simulationsprogrammes. Das Hauptprogramm SI steuert den Ablauf der Rechnung. Zunächst liest das Unterprogramm LAGER die Geometrie- und Betriebsdaten entweder von einer vorbereiteten Datei oder von der Tastatur ein und legt geeignete Anfangswerte für die Runge - Kutta - Rechnung fest. Dabei erfolgt eine umfassende Überprüfung auf sinnvolle Eingabedaten und gegebenenfalls die Ausgabe von Warnungen und Fehlermeldungen. Anschließend ruft SI das Unterprogramm GRENZE auf, um für die automatische Schrittweitensteuerung die Fehlergrenzen in Abhängigkeit von den Eingabedaten zu bestimmen. Auf diese Weise vermeidet man unnötig kleine Schrittweiten gegenüber einer Rechnung mit der maximalen Genauigkeit des Rechners. Auf Wunsch erzeugt anschließend das Unterprogramm AUSG eine Anzeige der Eingabedaten auf dem Bildschirm. Die Simulationsrechnung beginnt mit dem Aufruf von DELTAT. Hier wird zunächst mit der

¹⁾ Numerical Algorithms Group, Oxford

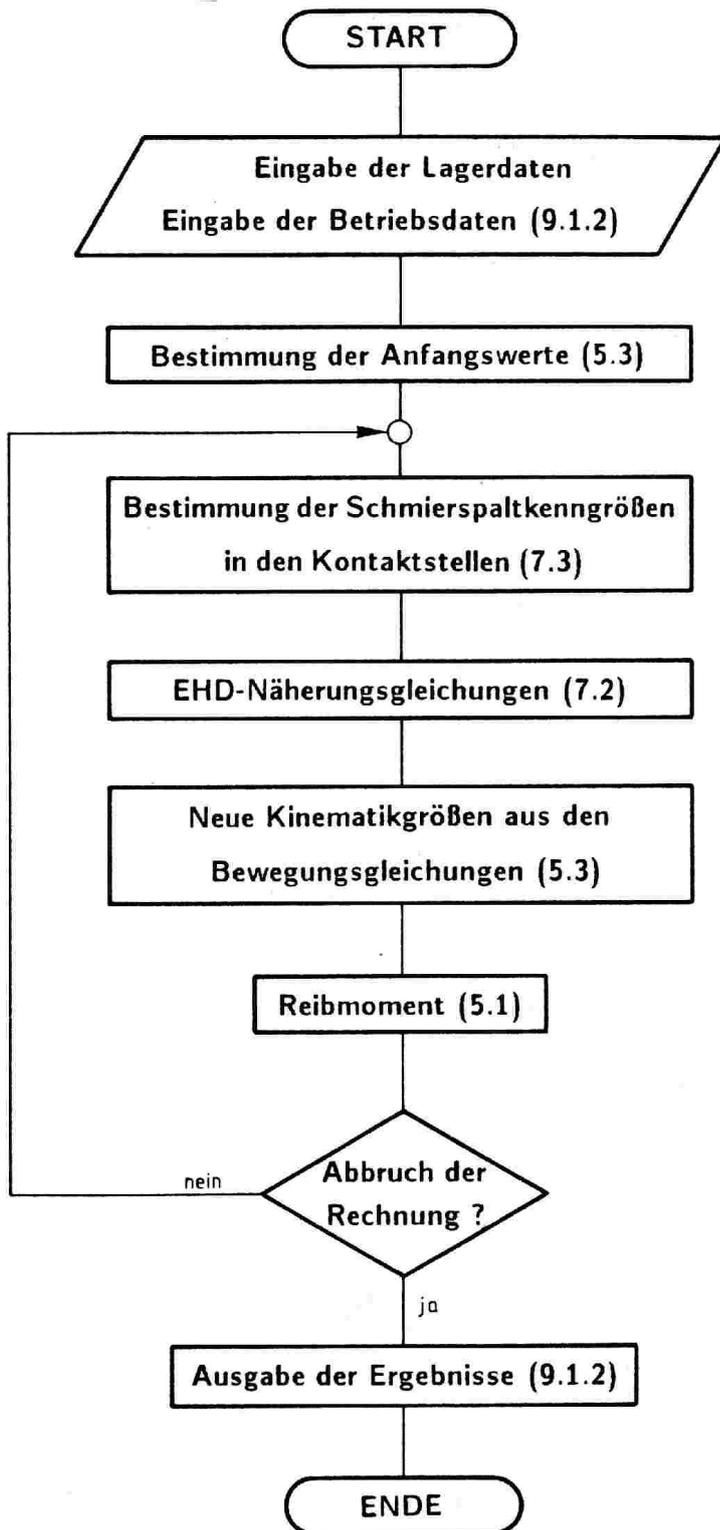


Bild 108: Programmablaufplan für Lagersimulation (Zahlen in Klammern verweisen auf Kapitel der vorliegenden Arbeit)

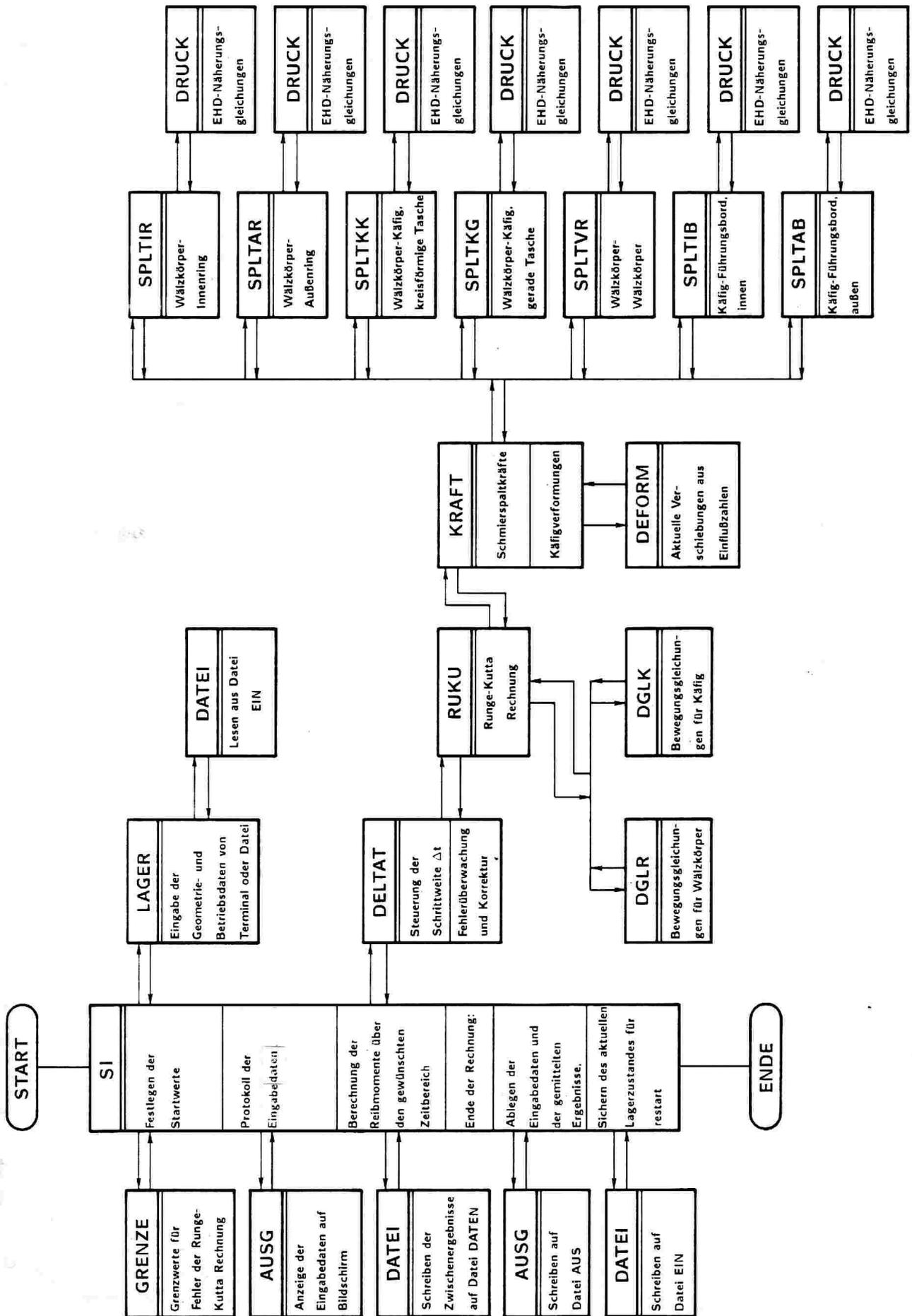


Bild 109: RLSI Programmstruktur

doppelten aktuellen Schrittweite $2\Delta t$ eine Grobrechnung durchgeführt. Ein Vergleich mit zwei aufeinander folgenden Feinrechnungen mit Δt führt auf eine Vergrößerung, Verkleinerung oder Beibehaltung der bisherigen Schrittweite. Die Integration der Bewegungsgleichungen übernimmt das Unterprogramm RUKU. Dazu werden zunächst die äußeren Kräfte und Momente auf Wälzkörper und Käfig ermittelt. Dies geschieht durch Berechnung der Kenngrößen in den infrage kommenden Schmierspalten (Unterprogramme SPLT..) und Auswertung der EHD-Näherungsgleichungen in dem Unterprogramm DRUCK. Anschließend liefert DEFORM die Verformung des Käfigs für den nächsten Zeitschritt. Darauf erfolgt der Rücksprung nach RUKU, um dort mit den von den Unterprogrammen DGLR und DGLK zur Verfügung gestellten Bewegungsgleichungen für Rollkörper und Käfig die neuen Kinematikgrößen zu errechnen. Wie in Abschnitt 5.3 erläutert, führt RUKU bei jedem Aufruf viermal die genannten Schritte durch. Nach dem Rücksprung über DELTAT in das Hauptprogramm, legt SI die neu berechneten Kinematikwerte sowie einige Lagerkenngrößen als Zwischenergebnisse auf der Datei DATEN ab (Abschn. 9.1.2 enthält genaue Angaben zu dem Aufbau dieser Datei). Der Aufruf von DELTAT und DATEI wiederholt sich, bis sich der quasistationäre Zustand des Lagers eingestellt hat. Danach schreibt das Unterprogramm AUSG die Eingabedaten, das mittlere Reibmoment sowie weitere Ergebnisse der Rechnung auf die Datei AUS. Um gegebenenfalls mit dem letzten ermittelten Zeitschritt später weiterrechnen zu können, sichert SI vor Beendigung der Rechnung mit Hilfe des Unterprogrammes DATEI alle aktuellen Werte zusätzlich in der Datei EIN.

9.1.2 Dateneingabe - Datenausgabe. Das Programm SI benutzt sechs Kanäle für den Datentransfer. Tafel 8 enthält eine Übersicht über die den einzelnen Kanalnummern zugeordneten Dateinamen.

Tafel 8: Dateinamen

Variablen- name	Vorein- stellung	Variablen- name	Vorein- stellung
KANAL1	1	FN1	IN
KANAL2	2	FN2	OUT
KANAL3	3	FN3	EIN
KANAL4	4	FN4	AUS
KANAL5	5	FN5	DATEN
KANAL6	6	FN6	VRTM
KANAL7	7	FN7	FEHLER

Die Kanäle 1 und 2 stehen für die Ein- bzw. Ausgabe über das Terminal zur Verfügung. Sie erlauben die Programmsteuerung und -kontrolle. Kanal 3 dient zum Einlesen von Geometrie- und Betriebsdaten sowie der letzten, von SI berechneten Kinematikgrößen. Eine Übersicht über die Eingabedaten und die Rechenergebnisse geht über Kanal 4 an die Datei AUS, während die Zwischenergebnisse über Kanal 5 in der Datei DATEN abgelegt werden. Bei Rechnungen mit verformbarem Käfig liest SI über Kanal 6 die Verformungs- Einflußzahlen aus der Datei VRTM ein. Der folgende Abschnitt enthält Erläuterungen zu den Eingabe- und Ausgabedaten sowie die Beschreibung der Dateistrukturen.

Nach dem Programmstart fragt SI zunächst nach Steuergrößen für die Simulationsrechnung. Es erscheint folgende Ausgabe auf dem Bildschirm :

```
-----  
RLSI V5.7                PRO-START : 1987/03/17 15.36.24  
-----  
+T/N  ? [ 0.00E-01]      (-:AUTOMATISCHER ABBRUCH)  
+DT   ? [ 1.00E-09]      (-:KONST. SCHRITTWEITE )  
NAUS  ? [          1]    (0:KEINE AUSGABE      )  
DAUS  ? [          1]    (0:KEINE AUSGABE      )  
?
```

- +T/N Angaben über den zu rechnenden Zeitbereich (E=Eingabewert)
E=0 Es soll nur die Eingabe von Geometrie- und Betriebsdaten erfolgen (keine Simulationsrechnung)
0<E<1 Zeitpunkt für Abbruch der Simulationsrechnung (Echtzeit)
E>1 Anzahl der zu rechnenden Zeitschritte
E<0 automatischer Abbruch der Rechnung bei Erreichen eines quasistationären Zustandes
- +DT Eingabe der Schrittweite für die Runge-Kutta-Rechnung
E<0 Es wird mit E als konstanter Schrittweite gerechnet
E>0 automatische Steuerung der Schrittweite mit E als Anfangswert
- NAUS Anzahl der auf Datei DATEN abzulegenden Zwischenergebnisse
E>0 Datei enthält zusätzlich Geometrie- und Betriebsdaten der aktuellen Rechnung
E<0 Datei enthält keine Geometrie- und Betriebsdaten
- DAUS Schalter für Eingabeecho der Geometrie- und Betriebsdaten
E=1 Eingabeecho auf Bildschirm
E=0 kein Eingabeecho
E<0 Kontrollausgaben in Kurzform, kein Eingabeecho

Das Unterprogramm LAGER fragt anschließend nach Einzelheiten über die Eingabe der Geometrie- und Betriebsdaten :

LESEN ? (DATEI:+IZS,-T / TERMINAL:-99)

E=-99 Lesen neuer Betriebsdaten vom Terminal

E<0 Einlesen der Geometrie- und Startwerte von Datei EIN. Es wird der dem Zeitpunkt E (Echtzeit) zugehörige Datensatz mit den Startwerten gelesen (nur möglich, wenn EIN mehrere Datensätze, z.B. Zwischenergebnisse enthält)

E>0 wie E<0, jedoch Identifizierung des gewünschten Datensatzes über die Zeitschrittnummer E

NW, RWC, BWC, MW, TETAW ?
RIC, EIC, BEIC, BEIPC ?
RAC, EAC, BEAC, BEAPC ?
RKTC, RTC, RKIC, RKAC, MK, TETAK ?
KREISFOERMIGE TASCHENKONTUR: TASCHENRADIUS =
RKNC, EMODK, RKRC ?
AUSSENBORDFUEHRUNG: RBRC, RBKC, BBC ?
RSOC OMSOC OMSOPC ?
ARBEITSTITEL :
(
?)

Für die Definition der Lagergeometrie und des Betriebszustandes benötigt SI sieben Datensätze. Diese sind von der Tastatur aus einzugeben, wenn auf die Frage "Lesen?" mit "-99" geantwortet wurde :

1.) Angaben zu den Wälzkörpern

NW Anzahl der Wälzkörper
RWC Wälzkörperradius [m]
BWC tragende Breite des Wälzkörpers [m]
MW Masse eines Wälzkörpers [kg]
TETAW Massenträgheitsmoment eines Wälzkörpers [kgm²]

2.) Angaben zum Innenring

RIC Laufbahnradius r_i^* [m] des Innenrings nach *Bild 54*
EIC Exzentrizität e_i^* [m] nach *Bild 54*
BEIC Lagewinkel β_{ei}^* [rad] der Innenring-Exzentrizität
BEIPC Winkelgeschwindigkeit $\dot{\beta}_i$ [rad/s] des Innenrings

3.) Angaben zum Außenring

RAC Laufbahnradius r_a^* [m] des Außenrings nach *Bild 54*
EAC Exzentrizität e_a^* [m] nach *Bild 54*
BEAC Lagewinkel β_{ea}^* [rad] der Außenring-Exzentrizität

- BEAPC Winkelgeschwindigkeit $\dot{\beta}_a$ [rad/s] des Außenrings
- 4.) Angaben zum Käfig
- RKTC E=0 kein Käfig (vollrolliges Lager)
E=10 Käfig mit gerader Taschenkontur
E<10 Abstand r_{kt}^* [m] zwischen Käfigmittelpunkt und Taschenmittelpunkt nach *Bild 54*
- RTC E= Taschenradius r_t^* [m] bei kreisförmiger Taschenkontur nach *Bild 54*
E= halbe Taschenbreite [m] bei gerader Taschenkontur nach *Bild 50*
- RKIC Abstand r_{ki}^* [m] zwischen Käfigmittelpunkt und innerer Taschenbegrenzung nach *Bild 54*. Negatives Vorzeichen bedeutet Innenbordführung des Käfigs.
- RKAC Abstand r_{ka}^* [m] zwischen Käfigmittelpunkt und äußerer Taschenbegrenzung nach *Bild 54*. Negatives Vorzeichen bedeutet Außenbordführung des Käfigs.
- MK Käfigmasse [kg]
- TETAK Massenträgheitsmoment des Käfigs [kgm²]
- 5.) Angaben zur Käfigverformung
- RKNC Knotenpunktradius r_{kn}^* [m] des elastischen Käfig-Ersatzrings (normalerweise gleich RKTC). Negatives Vorzeichen bedeutet starrer Käfig (keine Verformungsrechnung)
- EMODK Elastizitätsmodul des Käfigwerkstoffes [N/mm²]
- RKRC Radius der Käfigstegecke [m] bei Kippen nach *Bild 52*
- 6.) Angaben zur Bordführung des Käfigs
(nur erforderlich, wenn RKIC<0 oder RKAC<0)
- RBRC Führungsbordradius r_{bra}^* oder r_{bri}^* [m] des Lagerringes nach *Bild 56* bzw. *57*
- RBKC Stützzradius r_{bk}^* [m] des Käfigs am Lagerbord nach *Bild 56* bzw. *7.11*
- BBC gemeinsame Breite [m] von Führungsbord und Käfig
- 7.) Angaben zum Planetengetriebe
- RS0C Achsabstand [m] des Planetengetriebes
(für Standgetriebe : E=10⁵)
- OMS0C Winkelgeschwindigkeit [rad/s] des Planetenradträgers
(für Standgetriebe : E=9.9·10⁻³)
- OMS0PC Winkelbeschleunigung [rad/s²]

Das Programm arbeitet mit einem Lagerspiel, das sich aus den Radien der Laufbahnen und der Wälzkörper ergibt :

$$s_L = 2(r_a^* - 2r_w^* - r_i^*) \quad (271)$$

Bei negativem Lagerspiel (vorgespanntes Lager) erfolgt eine entsprechende Warnung, die aber nicht zu einem Abbruch der Rechnung führt.

Da SI mit einer idealen Zylinderform der Wälzkörper rechnet, ist bei profilierten Wälzkörpern die Breite BWC entsprechend niedriger anzusetzen.

Das Massenträgheitsmoment TETAK des Käfigs um seine Zentralachse läßt sich experimentell auf einfache Weise ermitteln. Lagert man den Käfigring reibungsarm auf einer Schneide im Abstand r zu seinem Mittelpunkt und lenkt den Schwerpunkt aus, so erhält man das Massenträgheitsmoment

$$\Theta_k = m_k r \left(\frac{9,81t^2}{4\pi^2 z^2} - r \right) \quad (272)$$

mit der Käfigmasse m_k in kg, dem Beobachtungszeitraum t in sec und der Anzahl der Pendelbewegungen z . Abweichungen von den analytisch berechneten Werten lagen bei Kontrollrechnungen unter 2%.

Die oben angegebenen Werte RS0C und OMS0C für die Berechnung von Standgetrieben ergeben eine Führungsnormalbeschleunigung auf das Lager von $1g$ bei einer vernachlässigbar kleinen Coriolisbeschleunigung.

Nach Eingabe der erforderlichen Geometrie- und Betriebsdaten sowie eines Arbeitstitels zur späteren Identifizierung des Rechenlaufes beginnt die Runge - Kutta - Rechnung. Um bei den oft erheblichen Rechenzeiten den Ablauf der Rechnung verfolgen zu können, gibt SI gleichzeitig mit der Ablage der Zwischenergebnisse in der Datei DATEN auf dem Bildschirm die Zeitschrittnummer, die gerechnete Echtzeit, die aktuelle Schrittweite und das Reibmoment aus. Zusätzlich wird jede Verkleinerung der Schrittweite angezeigt (s. Abschn.9.1.3).

Tafel 9 zeigt den Aufbau der Dateien DATEN und EIN. Während EIN immer den letzten Datensatz des Rechenlaufes enthält, sind in DATEN bei gleicher Struktur beliebig viele Datensätze mit Zwischenergebnissen abgelegt.

Tafel 9: Struktur der Dateien EIN und DATEN
(Bezeichnungen s. Abschn. 14.2)

1	:	Arbeitstitel (max. 20 Zeichen)				Datum/Uhrzeit (20 Zeichen)	
2	:	RNW	RWC	BWC	MW	TETAW	
3	:	RIC	EIC	BEIC	BEIPC		
4	:	RAC	EAC	BEAC	BEAPC		
5	:	RKTC	RTC	RKIC	RKAC	MK TETAK	
6	:	RKNC	EMODK	RKRC	RBRC	RBKC BBC	
7	:	RS0C	OMS0C	OMS0PC			
8	:	IZS	T				
9	:	RP(J)	BP(J)	AP(J)	R(J)	B(J)	
$9+n_w$:	WR(J)	WT(J)	D(J)			
$9+2n_w$:	EP	BEP	AKP	EK	BEK AK	
$15+2n_w$:	EKIN	PREIB	RES	GAMMA	SBP SAP	
$21+2n_w$:	FU2I	FU2A	FU2L	FU2R		
$25+2n_w$:	FY2I	FY2A	FY2L	FY2R		

Für das Eingabeecho und die Ausgabe der Rechenergebnisse nach Tafel 10 faßt das Unterprogramm AUSG die eingegebenen und berechneten Geometriegrößen sowie Lagerkenngrößen und Reibmoment für den betrachteten Betriebszustand in Tabellenform zusammen.

Tafel 10: Datei AUS

I	-----I			
I		I	START :	I
I		I	CPU-SEC	I
I		I	ENDE :	I
I	-----I			
I	G E O M E T R I E			
I	INNENRING	LAUFBAHNRADIUS	RIC	M
I		EXZENTRIZITAET	EIC	MYM
I		EXZENTRIZITAETSWINKEL	BEIC	GRAD
I	AUSSENRING	LAUFBAHNRADIUS	RAC	M
I		FUEHRUNGSBORDRADIUS	RBRC	M
I		FUEHRUNGSBORBREITE	BBC	M
I		EXZENTRIZITAET	EAC	MYM
I		EXZENTRIZITAETSWINKEL	BEAC	GRAD
I	WAE LZKOE RPER	RADIUS	RWC	M
I		BREITE	BWC	M
I		ANZAHL	NW	-
I	KA EFIG	AUSSENBORDGEFUEHRT		I
I		E-MODUL	EMODK	N/MM2
I		FUEHRUNGSRADIUS	RBKC	M
I		AUSSENRADIUS	RKAC	M
I		INNENRADIUS	RKIC	M
I		MITTENRADIUS	RKTC	M
I		TASCHENRADIUS	RTC	M
I		STEGKANTENRADIUS	RKRC	M
I	PLANETENGETRIEBE	ACHSABSTAND	RS C	M
I	-----I			
I	M A S S E N , - T R A E G H E I T S M O M E N T E			
I	WAE LZKOE RPER	MASSE	MW	KG
I		MASSE NTRAEGHEITSMOMENT	THETA W	KG*M2
I	KA EFIG	MASSE	MK	KG
I		MASSE NTRAEGHEITSMOMENT	THETA K	KG*M2
I	-----I			
I	K I N E M A T I K			
I	WINKELGESCHWINDIGKEIT	LAGERAUSSENRING	BEAPC	1/S
I		LAGERINNENRING	BEIPC	1/S
I		PLANETENRADTRAEGER	OMS C	1/S
I		KEIN LAUFBAHNWECHSEL		I
I	1. UMKEHRPUNKT	PLANETENRADTRAEGER	OMES1	1/S
I	2. UMKEHRPUNKT	PLANETENRADTRAEGER	OMES2	1/S
I	BESCHLEUNIGUNG	PLANETENRADTRAEGER	OMS PC	1/S2
I		FUEHRUNGSNORMALBESCHL.	AN	G
I	-----I			
I	O E L			
I	FVA-REFERENZOEL NR.3			I
I	TEMPERATUR	TOEL		GRAD
I	VISKOSITAET	VOEL		CSTK
I	-----I			
I	B E L A S T U N G			
I	MITTLERE RESULTIERENDE LAGERKRAFT	RES		N
I	MITTLERER KRAFTANGRIFFSWINKEL	GAMMA		GRAD
I	LAGERSPIEL IN DER LASTZONE	SL		MYM
I	MITTLERE LAGERSTEIFIGKEIT	LST		N/M
I	THEORETISCHE LASTZONE VON	BL1G		GRAD
I	BIS	BL2G		GRAD
I	-----I			
I	V E R L U S T L E I S T U N G			
I	ZURUECKGELEGTER WINKEL (ROLLE 1)	B(1)		GRAD
I	SCHLUPF (ROLLE 1) IN LAGERUMFANGSRICHTUNG	SCHB		%
I	MITTLERE REIBLEISTUNG	PRMI		W
I	MITTLERES REIBMOMENT	MRMI		NM
I	GEMITTELT VON T=	BIS		I
I	-----I			
I	S T E U E R G R O E S S E N			
I	ITERATIONSSCHRITTE	IZS		-
I	SCHRITTWEITENVERKLEINERUNGEN	IZV		-
I	SCHRITTWEITE	DT		I
I	ZEITBEREICH	T		S
I	ZEITSCHRITTE AUF DATEI	III		-
I	-----I			
I	-----RLSI V5.7-----I			

9.1.3 Beispiele. Dieser Abschnitt enthält Eingabedaten für die sechs in dieser Arbeit untersuchten Lagertypen, eine Beispielrechnung mit dem Lager 2309 MPA sowie eine Folge von Plotbildern eines Lagers mit vergrößerten Spielen zur Verdeutlichung der Lagereigendynamik.

Bei dem vollrolligen Lager SL18 2211 gibt man für die Größe RKTC wegen des fehlenden Käfigs "0" ein. Dabei läuft der folgende Dialog ab :

```
-----  
RLSI V5.7                PRO-START : 1987/03/17 16.10.16  
-----  
+T/N ? [ 0.00E-01]      (-:AUTOMATISCHER ABBRUCH)  
+DT  ? [ 1.00E-09]      (-:KONST. SCHRITTWEITE )  
NAUS ? [          1]    (O:KEINE AUSGABE      )  
DAUS ? [          1]    (O:KEINE AUSGABE      )  
? 0,0,0,0  
  
LESEN ? (DATEI:+IZS,-T / TERMINAL:-99)  
-99  
  
NW, RWC, BWC, MW, TETA W ?  
20,6.E-03,1.6E-02,1.509E-02,2.71E-07  
  
RIC, EIC, BEIC, BEIPC ?  
3.25E-02,0,0,0  
  
RAC, EAC, BEAC, BEAPC ?  
4.45E-02,0,0,0  
  
RKTC, RTC, RKIC, RKAC, MK, TETA K ?  
0,0,0,0,0,0  
  
LAGER VOLLROLLIG ! KAEFIG-GEOMETRIE WIRD IGNORIERT.  
  
RKNC, EMODK, RKRC ?  
0,0,0  
  
RSOC OMSOC OMSOPC ?  
2.1E-01,0,0  
  
          ARBEITSTITEL :  
(          )  
?SL18 2211  
-----
```

Tafel 11 gibt den Inhalt der Datei AUS und *Bild* 110 die von AW erstellte Zeichnung des Lagers im Startzustand wieder.

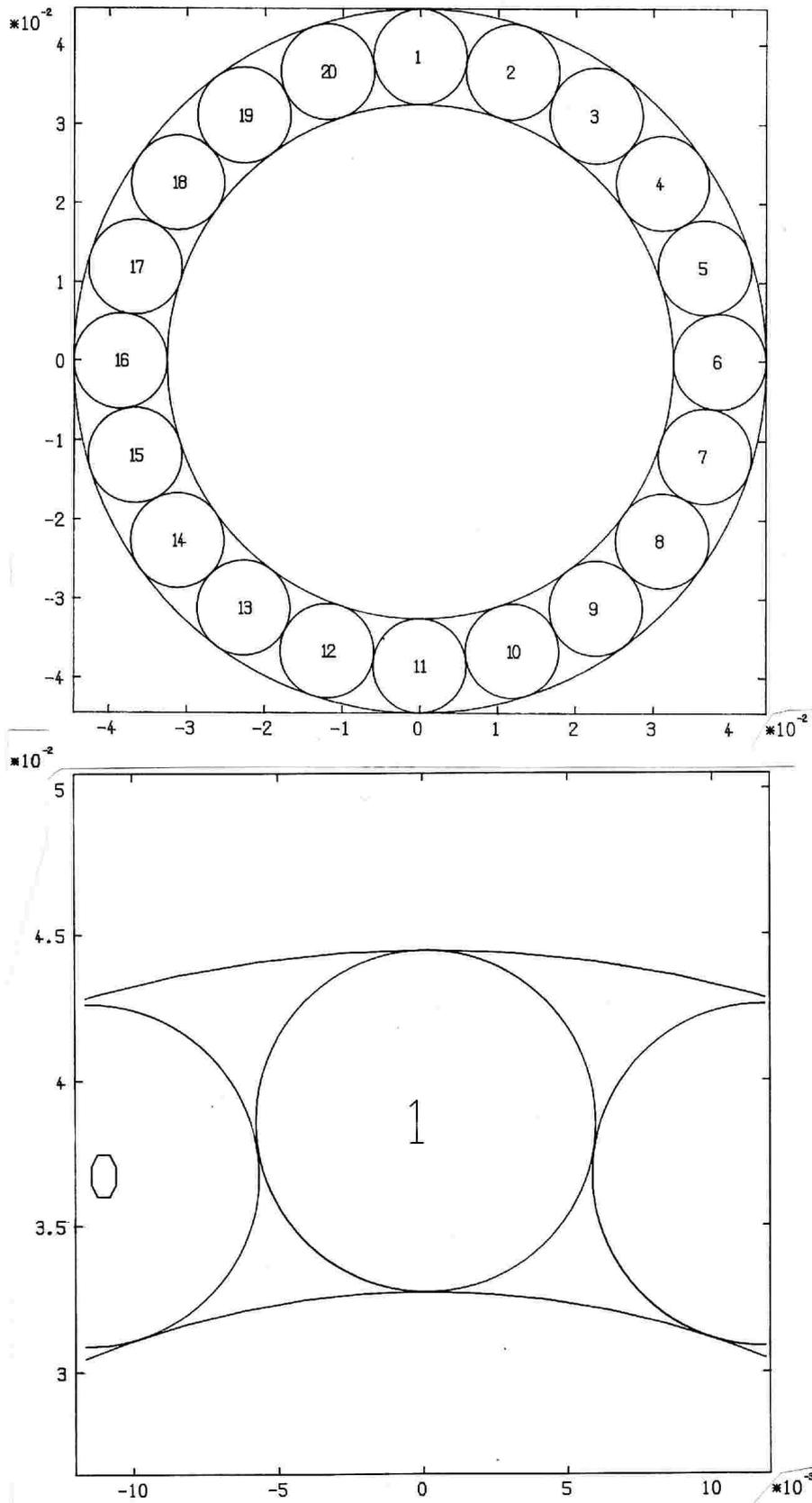


Bild 110: Startzustand des Lagers SL18 2211

Tafel 11: Inhalt der Datei AUS bei Lager SL18 2211

I	-----				I	
I		I	START :	1987/03/03	21.59.14	I
I	SL18 2211	I	CPU-SEC	0.00		I
I		I	ENDE :	1987/03/03	21.59.20	I
I	-----				I	
I	G E O M E T R I E					I
I	INNENRING	LAUFBAHRADIUS	RIC	0.032500	M	I
I		EXZENTRIZITAET	EIC	0.000000	MYM	I
I		EXZENTRIZITAETSWINKEL	BEIC	0.000000	GRAD	I
I	AUSSENRING	LAUFBAHRADIUS	RAC	0.044500	M	I
I		EXZENTRIZITAET	EAC	0.000000	MYM	I
I		EXZENTRIZITAETSWINKEL	BEAC	0.000000	GRAD	I
I	WAE LZKOE RPER	RADIUS	RWC	0.006000	M	I
I		BREITE	BWC	0.016000	M	I
I		ANZAHL	NW	20	-	I
I	VOLLROLLIG					I
I	PLANETENGETRIEBE	ACHSABSTAND	RSOC	0.210000	M	I
I	-----				I	
I	M A S S E N , - T R A E G H E I T S M O M E N T E					I
I	WAE LZKOE RPER	MASSE	MW	0.015090	KG	I
I		MASSENTRAE GHEITSMOMENT	THETA W	2.7100E-07	KG*M2	I
I	-----				I	
I	K I N E M A T I K					I
I	WINKELGESCHWINDIGKEIT	LAGERAUSSENRING	BEAPC	0.000000	1/S	I
I		LAGERINNENRING	BEIPC	0.000000	1/S	I
I		PLANETENRADTRAEGER	OMSOC	0.000000	1/S	I
I		KEIN LAUFBAHNWECHSEL				I
I	1. UMKEHRPUNKT	PLANETENRADTRAEGER	OMES1	0.000000	1/S	I
I	2. UMKEHRPUNKT	PLANETENRADTRAEGER	OMES2	0.000000	1/S	I
I	BESCHLEUNIGUNG	PLANETENRADTRAEGER	OMSOPC	0.000000	1/S2	I
I		FUEHRUNGSNORMALBESCHL.	AN	0.000000	G	I
I	-----				I	
I	O E L					I
I	FVA-REFERENZOEL NR.3					I
I	TEMPERATUR	TOEL	70.000000	GRAD		I
I	VISKOSITAET	VOEL	26.000000	CSTK		I
I	-----				I	
I	B E L A S T U N G					I
I	MITTLERE RESULTIERENDE LAGERKRAFT	RES	0.000000	N		I
I	MITTLERER KRAFTANGRIFFSWINKEL	GAMMA	0.000000	GRAD		I
I	LAGERSPIEL IN DER LASTZONE	SL	0.001863	MYM		I
I	MITTLERE LAGERSTEIFIGKEIT	LST	0.0000E-01	N/M		I
I	THEORETISCHE LASTZONE VON	BL1G	0.000000	GRAD		I
I		BIS	BL2G	0.000000	GRAD	I
I	-----				I	
I	V E R L U S T L E I S T U N G					I
I	ZURUECKGELEGTER WINKEL (ROLLE 1)	B (1)	0.000000	GRAD		I
I	SCHLUPF (ROLLE 1) IN LAGERUMFANGSRICHTUNG	SCHB	0.000000	%		I
I	MITTLERE REIBLEISTUNG	PRMI	0.000000	W		I
I	MITTLERES REIBMOMENT	MRMI	0.000000	NM		I
I	GEMITTELT VON T=0.0000E-01 BIS 0.0000E-01					I
I	-----				I	
I	I S T E U E R G R O E S S E N					I
I	ITERATIONSSCHRITTE	IZS	0	-		I
I	SCHRITTWEITENVERKLEINERUNGEN	IZV	0	-		I
I	SCHRITTWEITE	DT	VARIABEL			I
I	ZEITBEREICH	T	0.000000	S		I
I	ZEITSCHRITTE AUF DATEI	III	0	-		I
I	-----				I	
I	-----RLSI V5.7-----					I

Das wälzkörpergeführte Lager 2211 ECP mit Polyamidkäfig erfordert die Eingabe aller Käfigdaten nach Abschnitt 9.1.2. Bei kreisförmiger Taschenkontur sollte der Mittenradius RKTC im Normalfall gleich dem Teilkreisradius des Lagers sein, um eine gute Schmiegun g der Rollkörper in den Taschen zu erreichen. SI arbeitet jedoch auch mit Werten, die von dieser Regel abweichen.

```
-----  
RLSI V5.7          PRO-START : 1987/03/17 15.48.12  
-----  
+T/N ? [ 0.00E-01]      (-:AUTOMATISCHER ABBRUCH)  
+DT  ? [ 1.00E-09]      (-:KONST. SCHRITTWEITE  )  
NAUS ? [          1]      (O:KEINE AUSGABE      )  
DAUS ? [          1]      (O:KEINE AUSGABE      )  
? 0,0,0,0  
      LESEN ? (DATEI:+IZS,-T / TERMINAL:-99)  
      -99  
NW, RWC, BWC, MW, TETA W ?  
17,0.006,0.016,0.01487,2.6766E-7  
RIC, EIC, BEIC, BEIPC ?  
.033,0,0,0  
RAC, EAC, BEAC, BEAPC ?  
.045,0,0,0  
RKTC, RTC, RKIC, RKAC, MK, TETA K ?  
0.03900625,0.0061,0.03785,0.040835,0.01118,1.8841E-5  
KREISFOERMIGE TASCHENKONTUR: TASCHENRADIUS = 6.100E-03  
RKNC, EMODK, RKRC ?  
-.03900625,7500,0.0005  
RSOC OMSOC OMSOPC ?  
.21,0,0  
      ARBEITSTITEL :  
(                               )  
?NJ2211 ECP  
-----
```

Tafel 12 und *Bild* 111 geben die berechneten Werte wieder.

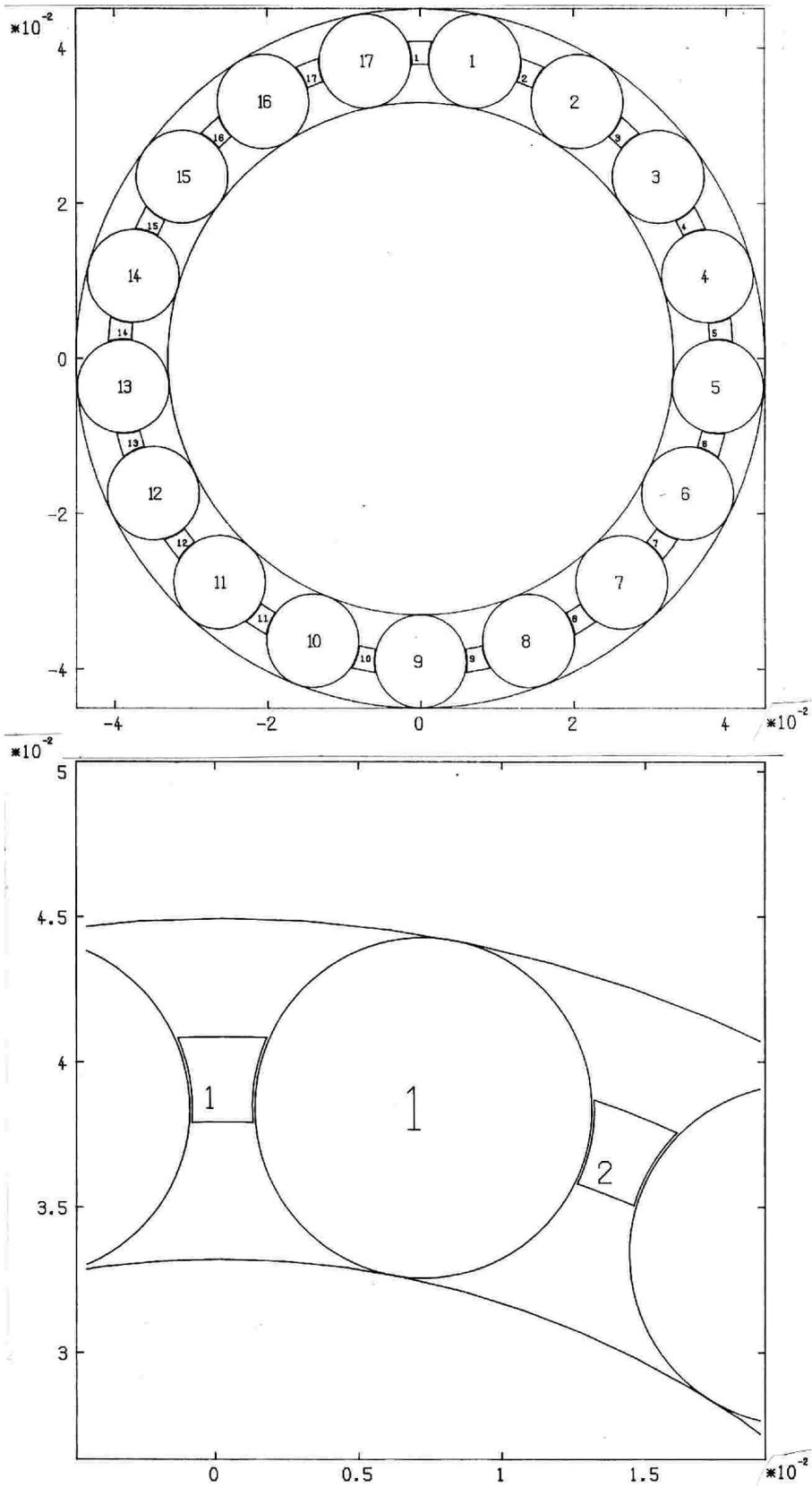


Bild 111: Startzustand des Lagers NJ2211 ECP

Tafel 12: Inhalt der Datei AUS bei Lager NJ2211 ECP

I		I	START	: 1987/03/03	21.12.40	I
I	NJ2211 ECP	I	CPU-SEC		0.00	I
I		I	ENDE	: 1987/03/03	21.12.46	I

I	G E O M E T R I E					I
I	INNENRING	LAUFBAHRADIUS	RIC	0.033000	M	I
I		EXZENTRIZITAET	EIC	0.000000	MYM	I
I		EXZENTRIZITAETSWINKEL	BEIC	0.000000	GRAD	I
I	AUSSENRING	LAUFBAHRADIUS	RAC	0.045000	M	I
I		EXZENTRIZITAET	EAC	0.000000	MYM	I
I		EXZENTRIZITAETSWINKEL	BEAC	0.000000	GRAD	I
I	WAE LZKOE RPER	RADIUS	RWC	0.006000	M	I
I		BREITE	BWC	0.016000	M	I
I		ANZAHL	NW	17	-	I
I	KA EFIG	WAE LZKOE RPERGEFUE HRT				I
I		E-MODUL	EMODK	7.5000E+03	N/MM2	I
I		AUSSEN RADIUS	RKAC	0.040835	M	I
I		INNEN RADIUS	RKIC	0.037850	M	I
I		MITTEN RADIUS	RKTC	0.039006	M	I
I		TASCHEN RADIUS	RTC	0.006100	M	I
I		STEGKANTEN RADIUS	RKRC	0.000500	M	I
I	PLANETENGETRIEBE	ACHSABSTAND	RSOC	0.210000	M	I

I	M A S S E N , - T R A E G H E I T S M O M E N T E					I
I	WAE LZKOE RPER	MASSE	MW	0.014870	KG	I
I		MASSENTRAE GHEITSMOMENT	THETA W	2.6766E-07	KG*M2	I
I	KA EFIG	MASSE	MK	0.011180	KG	I
I		MASSENTRAE GHEITSMOMENT	THETA K	1.8841E-05	KG*M2	I

I	K I N E M A T I K					I
I	WINKELGESCHWINDIGKEIT	LAGERAUSSENRING	BEAPC	0.000000	1/S	I
I		LAGERINNENRING	BEIPC	0.000000	1/S	I
I		PLANETENRADTRAE GER	OMSOC	0.000000	1/S	I
I		KEIN LAUFBAHNWECHSEL				I
I	1. UMKEHRPUNKT	PLANETENRADTRAE GER	OMES1	0.000000	1/S	I
I	2. UMKEHRPUNKT	PLANETENRADTRAE GER	OMES2	0.000000	1/S	I
I	BESCHLEUNIGUNG	PLANETENRADTRAE GER	OMSOPC	0.000000	1/S2	I
I		FUE HRUNGSNORMALBESCHL.	AN	0.000000	G	I

I	O E L					I
I	FVA-REFERENZOEL NR.3					I
I	TEMPERATUR		TOEL	70.000000	GRAD	I
I	VISKOSITAET		VOEL	26.000000	CSTK	I

I	B E L A S T U N G					I
I	MITTLERE RESULTIERENDE LAGERKRAFT		RES	0.000000	N	I
I	MITTLERER KRAFTANGRIFFSWINKEL		GAMMA	0.000000	GRAD	I
I	LAGERSPIEL IN DER LASTZONE		SL	0.001863	MYM	I
I	MITTLERE LAGERSTEIFIGKEIT		LST	0.0000E-01	N/M	I
I	THEORETISCHE LASTZONE VON		BL1G	0.000000	GRAD	I
I	BIS		BL2G	0.000000	GRAD	I

I	V E R L U S T L E I S T U N G					I
I	ZURUECKGELEGTER WINKEL (ROLLE 1)		B(1)	10.587968	GRAD	I
I	SCHLUPF (ROLLE 1) IN LAGERUMFANGSRICHTUNG		SCHB	0.000000	%	I
I	MITTLERE REIBLEISTUNG		PRMI	0.000000	W	I
I	MITTLERES REIBMOMENT		MRMI	0.000000	NM	I
I	GEMITTELT VON T=0.0000E-01 BIS 0.0000E-01					I

I	I S T E U E R G R O E S S E N					I
I	ITERATIONSSCHRITTE		IZS	0	-	I
I	SCHRITTWEITENVERKLEINERUNGEN		IZV	0	-	I
I	SCHRITTWEITE		DT	VARIABLEL		I
I	ZEITBEREICH		T	0.000000	S	I
I	ZEITSCHRITTE AUF DATEI		III	1	-	I

I-----RLSI V5.7-----I						

Als weiteres Beispiel für ein Lager mit wälzkörpergeführtem Käfig dient der Typ 2309 JP1 ¹⁾. Hier liegt ein gepreßter Stahlblechkäfig vor, dessen Berührflächen mit den Wälzkörpern näherungsweise als zylindrisch angenommen werden können. Eine gerade Taschenkontur würde bei SI immer die Parallelität zum Radialstrahl der Taschenmitte implizieren und damit eine Wälzkörperführung verhindern.

```
-----  
RLSI V5.7          PRO-START : 1987/03/17 15.53.28  
-----  
+T/N ? [ 0.00E-01]      (-:AUTOMATISCHER ABBRUCH)  
+DT ? [ 1.00E-09]      (-:KONST. SCHRITTWEITE )  
NAUS ? [          1]   (O:KEINE AUSGABE      )  
DAUS ? [          1]   (O:KEINE AUSGABE      )  
? 0,0,0,0  
  
LESEN ? (DATEI:+IZS,-T / TERMINAL:-99)  
-99  
  
NW, RWC, BWC, MW, TETA W ?  
12,7.5E-03,2.4E-02,3.1215E-02,8.778E-07  
  
RIC, EIC, BEIC, BEIPC ?  
2.924E-02,0,0,0  
  
RAC, EAC, BEAC, BEAPC ?  
4.426E-02,0,0,0  
  
RKTC, RTC, RKIC, RKAC, MK, TETAK ?  
3.675E-02,7.941E-03,3.96E-02,4.11E-02,0.23304,3.38E-04  
  
KREISFOERMIGE TASCHENKONTUR: TASCHENRADIUS = 7.941E-03  
  
RKNC, EMODK, RKRC ?  
-3.845E-02,2.1E+05,0.0001  
  
RSOC OMSOC OMSOPC ?  
2.1E-01,0,0  
  
          ARBEITSTITEL :  
(                )  
?2309 JP1  
-----
```

Die Eingabe- bzw. Startwerte sind Tafel 13 und *Bild* 112 zu entnehmen.

¹⁾ Bezeichnung der Firma FAG, Schweinfurt

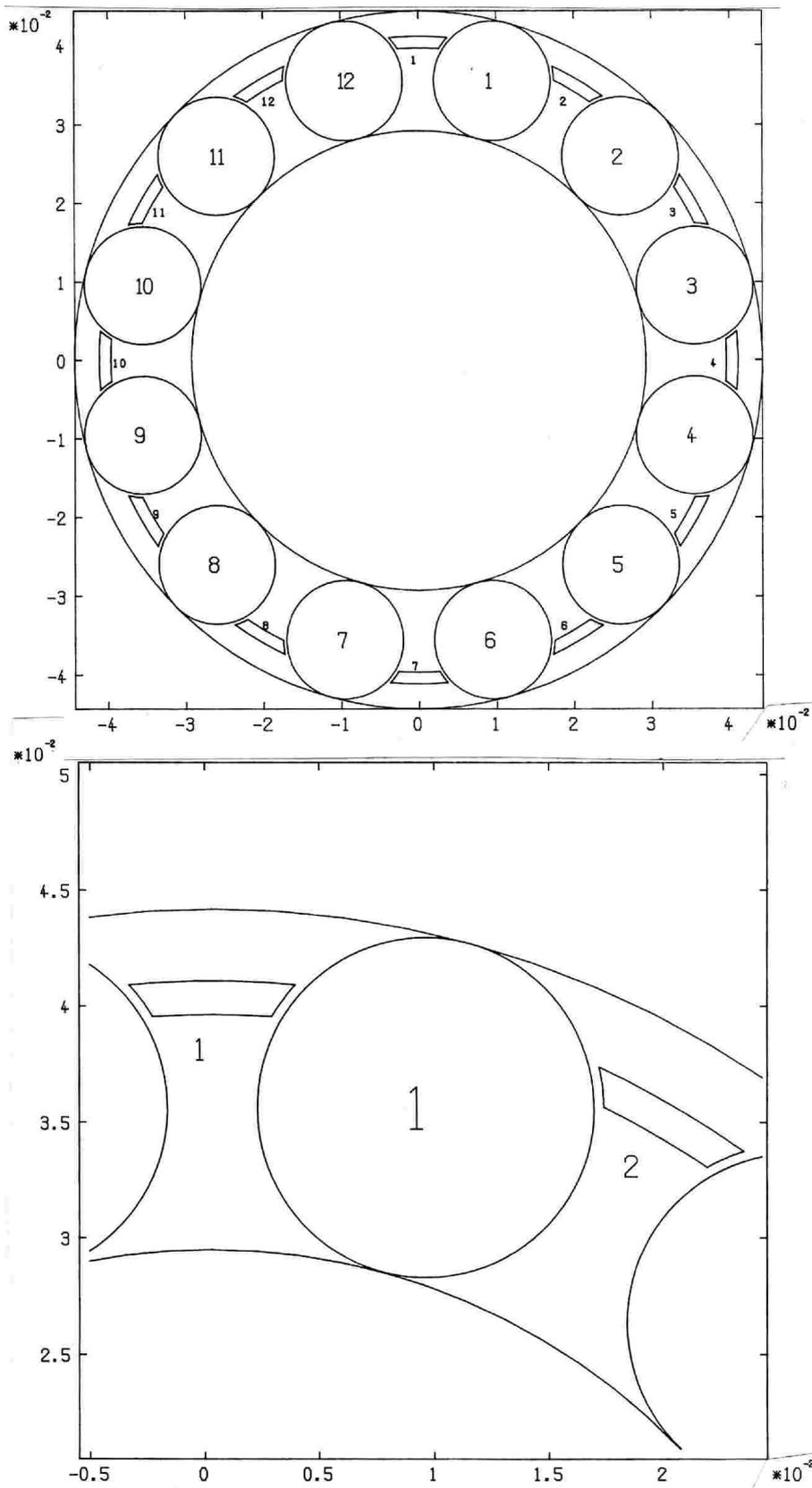


Bild 112: Startzustand des Lagers NJ2309 JP1

Tafel 13: Inhalt der Datei AUS bei Lager NJ2309 JP1

I								
I			I	START :	1987/03/03	21.09.57		
I	2309 JP1		I	CPU-SEC	0.00			
I			I	ENDE :	1987/03/03	21.10.03		
I	-----							
I	G E O M E T R I E							
I	INNENRING	LAUFBAHRADIUS	RIC	0.029240	M			
I		EXZENTRIZITAET	EIC	0.000000	MYM			
I		EXZENTRIZITAETSWINKEL	BEIC	0.000000	GRAD			
I	AUSSENRING	LAUFBAHRADIUS	RAC	0.044260	M			
I		EXZENTRIZITAET	EAC	0.000000	MYM			
I		EXZENTRIZITAETSWINKEL	BEAC	0.000000	GRAD			
I	WAE LZKOE RPER	RADIUS	RWC	0.007500	M			
I		BREITE	BWC	0.024000	M			
I		ANZAHL	NW	12	-			
I	KA EFIG	WAE LZKOE RPERGEFUE HRT						
I		E-MODUL	EMODK	2.1000E+05	N/MM2			
I		AUSSEN RADIUS	RKAC	0.041100	M			
I		INNEN RADIUS	RKIC	0.039600	M			
I		MITTEN RADIUS	RKTC	0.036750	M			
I		TASCHEN RADIUS	RTC	0.007941	M			
I		STEGKANTEN RADIUS	RKRC	1.000000	M			
I	PLANETENGETRIEBE	ACHSABSTAND	RSOC	0.210000	M			
I	-----							
I	M A S S E N , - T R A E G H E I T S M O M E N T E							
I	WAE LZKOE RPER	MASSE	MW	0.031215	KG			
I		MASSENTRAE GHEITSMOMENT	THETA W	8.7780E-07	KG*M2			
I	KA EFIG	MASSE	MK	0.233040	KG			
I		MASSENTRAE GHEITSMOMENT	THETA K	3.3800E-04	KG*M2			
I	-----							
I	K I N E M A T I K							
I	WINKELGESCHWINDIGKEIT	LAGERAUSSENRING	BEAPC	0.000000	1/S			
I		LAGERINNENRING	BEIPC	0.000000	1/S			
I		PLANETENRADTRAE GER	OMSOC	0.000000	1/S			
I		KEIN LAUFBAHNWECHSEL						
I	1. UMKEHRPUNKT	PLANETENRADTRAE GER	OMES1	0.000000	1/S			
I	2. UMKEHRPUNKT	PLANETENRADTRAE GER	OMES2	0.000000	1/S			
I	BESCHLEUNIGUNG	PLANETENRADTRAE GER	OMSOPC	0.000000	1/S2			
I		FUE HRUNGSNORMALBESCHL.	AN	0.000000	G			
I	-----							
I	O E L							
I	FVA-REFERENZOEL NR.3							
I	TEMPERATUR		TOEL	70.000000	GRAD			
I	VISKOSITAET		VOEL	26.000000	CSTK			
I	-----							
I	B E L A S T U N G							
I	MITTLERE RESULTIERENDE LAGERKRAFT		RES	0.000000	N			
I	MITTLERER KRAFTANGRIFFSWINKEL		GAMMA	0.000000	GRAD			
I	LAGERSPIEL IN DER LASTZONE		SL	20.000153	MYM			
I	MITTLERE LAGERSTEIFIGKEIT		LST	0.0000E-01	N/M			
I	THEORETISCHE LASTZONE VON		BL1G	0.000000	GRAD			
I		BIS	BL2G	0.000000	GRAD			
I	-----							
I	V E R L U S T L E I S T U N G							
I	ZURUECKGELEGTER WINKEL (ROLLE 1)		B(1)	14.999600	GRAD			
I	SCHLUPF (ROLLE 1) IN LAGERUMFANGSRICHTUNG		SCHB	0.000000	%			
I	MITTLERE REIBLEISTUNG		PRMI	0.000000	W			
I	MITTLERES REIBMOMENT		MRMI	0.000000	NM			
I	GEMITTELT VON T=0.0000E-01 BIS 0.0000E-01							
I	-----							
I	I S T E U E R G R O E S S E N							
I	ITERATIONSSCHRITTE		IZS	0	-			
I	SCHRITTWEITENVERKLEINERUNGEN		IZV	0	-			
I	SCHRITTWEITE		DT	VARIABEL				
I	ZEITBEREICH		T	0.000000	S			
I	ZEITSCHRITTE AUF DATEI		III	0	-			
I	-----							
I	-----RLSI V5.7-----							

Der außenbordgeführte Messingkäfig mit kreisförmigen Taschen des Lagers 2211 ECMA verlangt ein negatives Vorzeichen für die Eingabe von RKA, damit das Programm die Außenbordführung erkennt (s. Abschn. 9.1.2). Der Eingabedialog lautet :

```
-----  
RLSI V5.7          PRO-START : 1987/03/17 15.36.24  
-----  
+T/N ? [ 0.00E-01]      (-:AUTOMATISCHER ABBRUCH)  
+DT  ? [ 1.00E-09]      (-:KONST. SCHRITTWEITE )  
NAUS ? [          1]    (O:KEINE AUSGABE      )  
DAUS ? [          1]    (O:KEINE AUSGABE      )  
? 0,0,0,0  
  
LESEN ? (DATEI:+IZS,-T / TERMINAL:-99)  
-99  
  
NW, RWC, BWC, MW, TETA W ?  
17,0.006,0.016,0.0149,2.67E-7  
  
RIC, EIC, BEIC, BEIPC ?  
.033,0,0,0  
  
RAC, EAC, BEAC, BEAPC ?  
.045,0,0,0  
  
RKTC, RTC, RKIC, RKAC, MK, TETA K ?  
0.039,0.0064,0.03597,-0.042300,0.1329,2.09E-4  
  
KREISFOERMIGE TASCHENKONTUR: TASCHENRADIUS = 6.400E-03  
  
RKNC, EMODK, RKRC ?  
-.0391375,80000,0.0001  
  
AUSSENBORDFUEHRUNG: RBRC, RBKC, BBC ?  
0.043125,0.042965,0.0065  
  
RSOC OMSOC OMSOPC ?  
.21,0,0  
  
***** WARNUNG ***** : LAGER UNBELASTET !  
(RIC, RAC, RWC, EAC/EIC)  
  
          ARBEITSTITEL :  
(          )  
?NJ2211ECMA  
-----
```

Tafel 14 und *Bild* 113 enthalten die Graphikausgaben und die Eingabewerte.

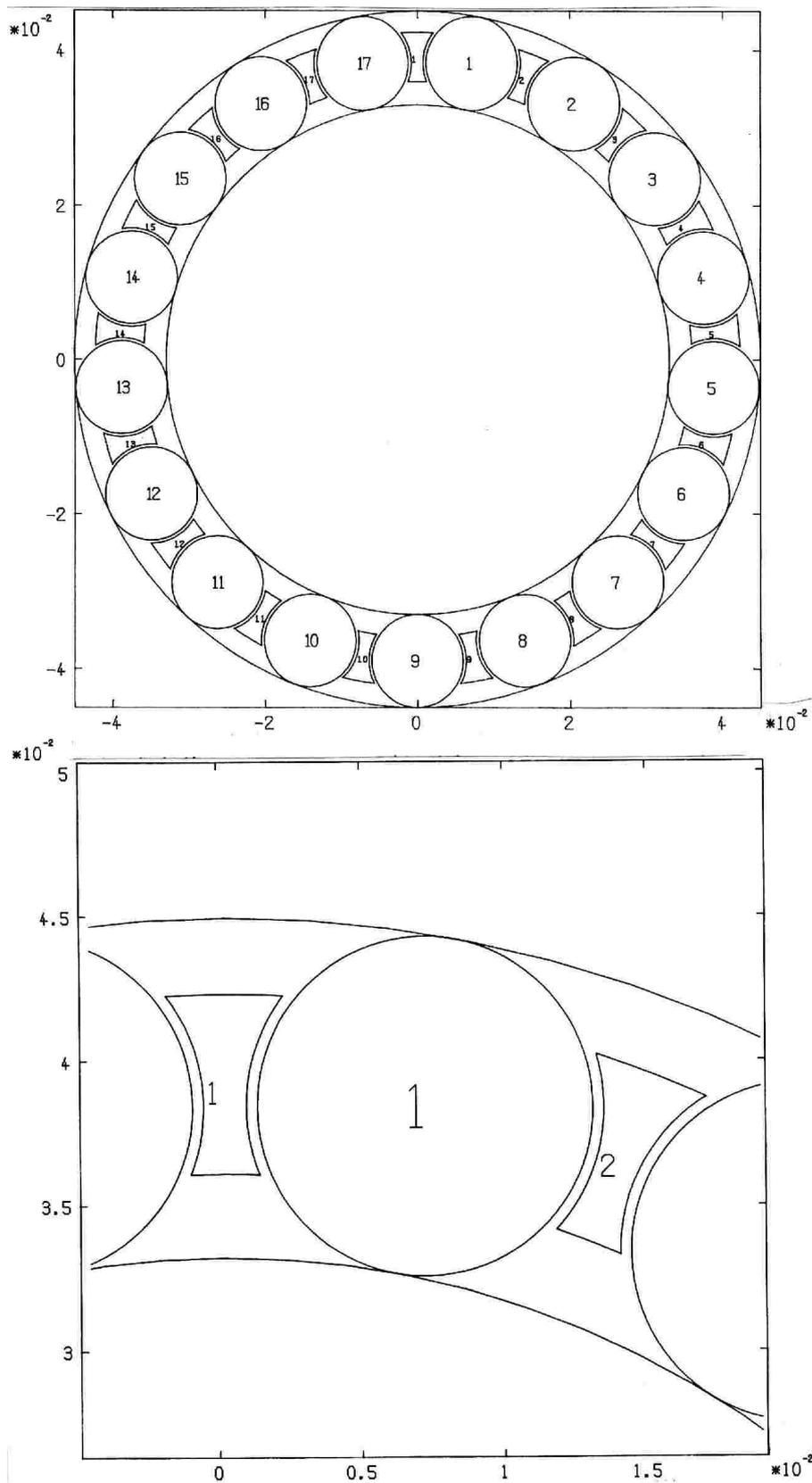


Bild 113: Startzustand des Lagers NJ2211 ECMA

Tafel 14: Inhalt der Datei AUS bei Lager NJ2211 ECMA

I		I	START	:	1987/03/03	13.59.18	I	
I	NJ2211ECMA	I	CPU-SEC		0.00		I	
I		I	ENDE	:	1987/03/03	13.59.25	I	

I	G E O M E T R I E							I
I	INNENRING	LAUFBAHRADIUS	RIC		0.033000	M	I	
I		EXZENTRIZITAET	EIC		0.000000	MYM	I	
I		EXZENTRIZITAETSWINKEL	BEIC		0.000000	GRAD	I	
I	AUSSENRING	LAUFBAHRADIUS	RAC		0.045000	M	I	
I		FUEHRUNGSBORDRADIUS	RBRC		0.043125	M	I	
I		FUEHRUNGSORBREITE	BBC		0.006500	M	I	
I		EXZENTRIZITAET	EAC		0.000000	MYM	I	
I		EXZENTRIZITAETSWINKEL	BEAC		0.000000	GRAD	I	
I	WAE LZK O E R P E R	RADIUS	RWC		0.006000	M	I	
I		BREITE	BWC		0.016000	M	I	
I		ANZAHL	NW		17	-	I	
I	KAEFIG	AUSSENBORDGEFUEHRT					I	
I		E-MODUL	EMODK		8.0000E+04	N/MM2	I	
I		FUEHRUNGSRADIUS	RBKC		0.042965	M	I	
I		AUSSEN RADIUS	RKAC		0.042300	M	I	
I		INNEN RADIUS	RKIC		0.035970	M	I	
I		MITTEN RADIUS	RKTC		0.039000	M	I	
I		TASCHEN RADIUS	RTC		0.006400	M	I	
I		STEGKANTEN RADIUS	RKRC		0.000100	M	I	
I	PLANETENGETRIEBE	ACHSABSTAND	RSOC		0.210000	M	I	

I	M A S S E N , - T R A E G H E I T S M O M E N T E							I
I	WAE LZK O E R P E R	MASSE	MW		0.014900	KG	I	
I		MASSENTRAE GHEITSMOMENT	THETA W		2.6700E-07	KG*M2	I	
I	KAEFIG	MASSE	MK		0.132900	KG	I	
I		MASSENTRAE GHEITSMOMENT	THETA K		2.0900E-04	KG*M2	I	

I	K I N E M A T I K							I
I	WINKELGESCHWINDIGKEIT	LAGERAUSSENRING	BEAPC		0.000000	1/S	I	
I		LAGERINNENRING	BEIPC		0.000000	1/S	I	
I		PLANETENRADTRAEGER	OMSOC		0.000000	1/S	I	
I		KEIN LAUFBAHNWECHSEL					I	
I	1. UMKEHRPUNKT	PLANETENRADTRAEGER	OMES1		0.000000	1/S	I	
I	2. UMKEHRPUNKT	PLANETENRADTRAEGER	OMES2		0.000000	1/S	I	
I	BESCHLEUNIGUNG	PLANETENRADTRAEGER	OMSOPC		0.000000	1/S2	I	
I		FUEHRUNGSNORMALBESCHL.	AN		0.000000	G	I	

I	O E L							I
I	FVA-REFERENZOEL NR.3						I	
I	TEMPERATUR	TOEL			70.000000	GRAD	I	
I	VISKOSITAET	VOEL			26.000000	CSTK	I	

I	B E L A S T U N G							I
I	MITTLERE RESULTIERENDE LAGERKRAFT	RES			0.000000	N	I	
I	MITTLERER KRAFTANGRIFFSWINKEL	GAMMA			0.000000	GRAD	I	
I	LAGERSPIEL IN DER LASTZONE	SL			0.001863	MYM	I	
I	MITTLERE LAGERSTEIFIGKEIT	LST			0.0000E-01	N/M	I	
I	THEORETISCHE LASTZONE VON	BL1G			0.000000	GRAD	I	
I		BIS	BL2G		0.000000	GRAD	I	

I	V E R L U S T L E I S T U N G							I
I	ZURUECKGELEGTER WINKEL (ROLLE 1)	B(1)			10.587968	GRAD	I	
I	SCHLUPF (ROLLE 1) IN LAGERUMFANGSRICHTUNG	SCHB			0.000000	%	I	
I	MITTLERE REIBLEISTUNG	PRMI			0.000000	W	I	
I	MITTLERES REIBMOMENT	MRMI			0.000000	NM	I	
I	GEMITTELT VON T=0.0000E-01 BIS 0.0000E-01						I	

I	I S T E U E R G R O E S S E N							I
I	ITERATIONSSCHRITTE	IZS			0	-	I	
I	SCHRITTWEITENVERKLEINERUNGEN	IZV			0	-	I	
I	SCHRITTWEITE	DT			VARIABEL		I	
I	ZEITBEREICH	T			0.000000	S	I	
I	ZEITSCHRITTE AUF DATEI	III			1	-	I	

I-----RLSI V5.7-----I								

Die gerade, parallel zum Radialstrahl verlaufende Taschenkontur des Lagers 2309 MPA mit Messingmassivkäfig berücksichtigt man mit der Eingabe "10" für RKTC. Die übrige Eingabe verläuft wie bei dem Lager 2211 ECMA.

```
-----  
RLSI V5.7          PRO-START : 1987/03/17 15.57.53  
-----  
+T/N ? [ 0.00E-01]      (-:AUTOMATISCHER ABRUCH)  
+DT  ? [ 1.00E-09]      (-:KONST. SCHRITTWEITE )  
NAUS ? [          1]    (O:KEINE AUSGABE      )  
DAUS ? [          1]    (O:KEINE AUSGABE      )  
? 0,0,0,0  
LESEN ? (DATEI:+IZS,-T / TERMINAL:-99)  
-99  
NW, RWC, BWC, MW, TETA W ?  
12,7.5E-03,2.4E-02,3.1215E-02,8.778E-07  
RIC, EIC, BEIC, BEIPC ?  
2.924E-02,0,0,0  
RAC, EAC, BEAC, BEAPC ?  
4.426E-02,0,0,0  
RKTC, RTC, RKIC, RKAC, MK, TETA K ?  
10,7.7E-03,3.525E-02,-4.165E-02,2.33E-01,3.4E-04  
GERADE TASCHENKONTUR: HALBE TASCHENBREITE = 7.700E-03  
RKNC, EMODK, RKRC ?  
-3.845E-02,8.E+04,0.0001  
AUSSENBORDFUEHRUNG: RBRC, RBKC, BBC ?  
4.19E-02,4.165E-02,1.3132E-02  
RSOC OMSOC OMSOPC ?  
2.1E-01,0,0  
          ARBEITSTITEL :  
(          )  
?2309 MPA  
-----
```

Tafel 15 und *Bild* 114 zeigen die Rechenergebnisse.

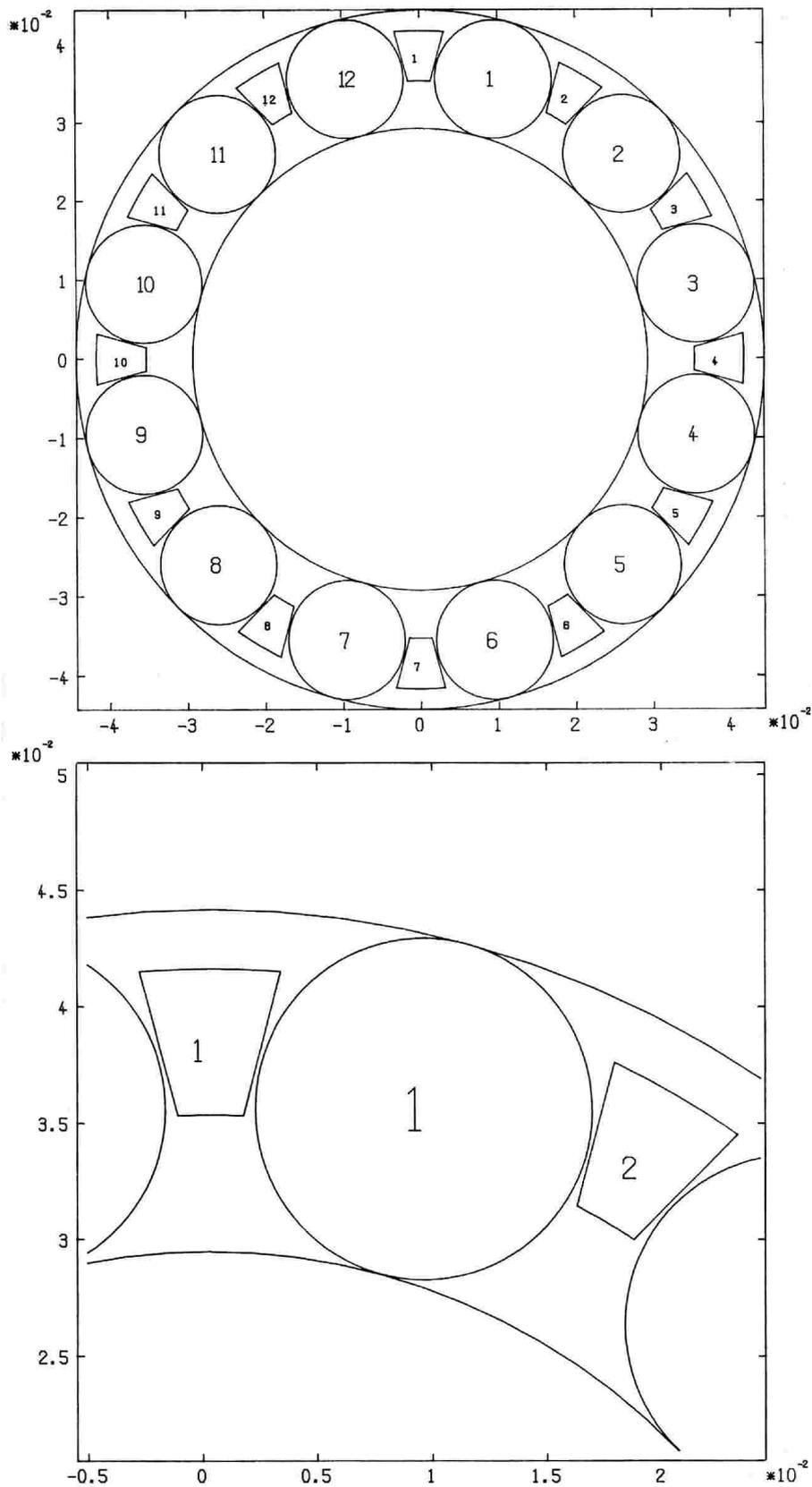


Bild 114: Startzustand des Lagers NJ2309 MPA

Tafel 15: Inhalt der Datei AUS bei Lager NJ2309 MPA

I					
I		I	START :	1987/03/03	21.10.42
I	2309 MPA	I	CPU-SEC	0.00	
I		I	ENDE :	1987/03/03	21.10.48
I	-----				
I	G E O M E T R I E				
I	INNENRING	LAUFBAHRADIUS	RIC	0.029240	M
I		EXZENTRIZITAET	EIC	0.000000	MYM
I		EXZENTRIZITAETSWINKEL	BEIC	0.000000	GRAD
I	AUSSENRING	LAUFBAHRADIUS	RAC	0.044260	M
I		FUEHRUNGSBORDRADIUS	RBRC	0.041900	M
I		FUEHRUNGSBORBREITE	BBC	0.013132	M
I		EXZENTRIZITAET	EAC	0.000000	MYM
I		EXZENTRIZITAETSWINKEL	BEAC	0.000000	GRAD
I	WAE LZKOE RPER	RADIUS	RWC	0.007500	M
I		BREITE	BWC	0.024000	M
I		ANZAHL	NW	12	-
I	KAEFIG	AUSSENBORDGEFUEHRT			
I		E-MODUL	EMODK	8.0000E+04	N/MM2
I		FUEHRUNGSRADIUS	RBKC	0.041650	M
I		AUSSEN RADIUS	RKAC	0.041650	M
I		INNEN RADIUS	RKIC	0.035250	M
I		HALBE TASCHENBREITE	RTC	0.007700	M
I	PLANETENGETRIEBE	ACHSABSTAND	RSOC	0.210000	M
I	-----				
I	M A S S E N , - T R A E G H E I T S M O M E N T E				
I	WAE LZKOE RPER	MASSE	MW	0.031215	KG
I		MASSENTRAE GHEITSMOMENT	THETA W	8.7780E-07	KG*M2
I	KAEFIG	MASSE	MK	0.233000	KG
I		MASSENTRAE GHEITSMOMENT	THETA K	3.4000E-04	KG*M2
I	-----				
I	K I N E M A T I K				
I	WINKELGESCHWINDIGKEIT	LAGERAUSSENRING	BEAPC	0.000000	1/S
I		LAGERINNENRING	BEIPC	0.000000	1/S
I		PLANETENRADTRAEGER	OMSOC	0.000000	1/S
I		KEIN LAUFBAHNWECHSEL			
I	1. UMKEHRPUNKT	PLANETENRADTRAEGER	OMES1	0.000000	1/S
I	2. UMKEHRPUNKT	PLANETENRADTRAEGER	OMES2	0.000000	1/S
I	BESCHLEUNIGUNG	PLANETENRADTRAEGER	OMSOPC	0.000000	1/S2
I		FUEHRUNGSNORMALBESCHL. AN		0.000000	G
I	-----				
I	O E L				
I	FVA-REFERENZOEL NR.3				
I	TEMPERATUR	TOEL		70.000000	GRAD
I	VISKOSITAET	VOEL		26.000000	CSTK
I	-----				
I	B E L A S T U N G				
I	MITTLERE RESULTIERENDE LAGERKRAFT	RES		0.000000	N
I	MITTLERER KRAFTANGRIFFSWINKEL	GAMMA		0.000000	GRAD
I	LAGERSPIEL IN DER LASTZONE	SL		20.000153	MYM
I	MITTLERE LAGERSTEIFIGKEIT	LST		0.0000E-01	N/M
I	THEORETISCHE LASTZONE VON	BL1G		0.000000	GRAD
I	BIS	BL2G		0.000000	GRAD
I	-----				
I	V E R L U S T L E I S T U N G				
I	ZURUECKGELEGTER WINKEL (ROLLE 1)	B(1)		14.999600	GRAD
I	SCHLUPF (ROLLE 1) IN LAGERUMFANGSRICHTUNG	SCHB		0.000000	%
I	MITTLERE REIBLEISTUNG	PRMI		0.000000	W
I	MITTLERES REIBMOMENT	MRMI		0.000000	NM
I	GEMITTELT VON T=0.0000E-01 BIS 0.0000E-01				
I	-----				
I	I S T E U E R G R O E S S E N				
I	ITERATIONSSCHRITTE	IZS		0	-
I	SCHRITTWEITENVERKLEINERUNGEN	IZV		0	-
I	SCHRITTWEITE	DT		VARIABLE	
I	ZEITBEREICH	T		0.000000	S
I	ZEITSCHRITTE AUF DATEI	III		0	-
I	-----				
I	-----RLSI V5.7-----				

Die Nadellager NA4911 und NKI 55/25 enthalten gepreßte Stahlblechkäfige, die - wie oben für den Typ 2309 JP1 beschrieben - näherungsweise mit der kreisförmigen Taschenkontur erfasst werden. Sie unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der Abmessungen.

```
-----  
RLSI V5.7          PRO-START : 1987/03/17 16.01.59  
-----  
+T/N ? [ 0.00E-01]      (-:AUTOMATISCHER ABBRUCH)  
+DT  ? [ 1.00E-09]      (-:KONST. SCHRITTWEITE )  
NAUS ? [          1]      (O:KEINE AUSGABE      )  
DAUS ? [          1]      (O:KEINE AUSGABE      )  
? 0,0,0,0  
  
LESEN ? (DATEI:+IZS,-T / TERMINAL:-99)  
-99  
  
NW, RWC, BWC, MW, TETAW ?  
26,0.00275,0.018,3.5E-3,1.33E-8  
  
RIC, EIC, BEIC, BEIPC ?  
0.0315,0,0,0  
  
RAC, EAC, BEAC, BEAPC ?  
0.0370,0,0,0  
  
RKTC, RTC, RKIC, RKAC, MK, TETAK ?  
0.03425,0.00285,0.033,-0.034,0.0299,3.4E-5  
  
KREISFOERMIGE TASCHENKONTUR: TASCHENRADIUS = 2.850E-03  
  
RKNC, EMODK, RKRC ?  
-0.033873,2.1E5,0.0005  
  
AUSSENBORDFUEHRUNG: RBRC, RBKC, BBC ?  
0.03535,0.0353,0.006  
  
RSOC OMSOC OMSOPC ?  
0.21,0,0  
  
          ARBEITSTITEL :  
(                )  
?NA4911  
-----
```

```
-----  
RLSI V5.7          PRO-START : 1987/03/17 16.06.10  
-----  
+T/N ? [ 0.00E-01]      (-:AUTOMATISCHER ABBRUCH)  
+DT  ? [ 1.00E-09]      (-:KONST. SCHRITTWEITE )  
NAUS ? [          1]    (O:KEINE AUSGABE      )  
DAUS ? [          1]    (O:KEINE AUSGABE      )  
? 0,0,0,0  
  
LESEN ? (DATEI:+IZS,-T / TERMINAL:-99)  
-99  
  
NW, RWC, BWC, MW, TETAW ?  
36,0.00175,0.018,1.42E-3,2.17E-9  
  
RIC, EIC, BEIC, BEIPC ?  
0.03,0,0,0  
  
RAC, EAC, BEAC, BEAPC ?  
0.0335,0,0,0  
  
RKTC, RTC, RKIC, RKAC, MK, TETAK ?  
0.03175,0.00185,0.031,-0.032,0.0264,2.6E-5  
  
KREISFOERMIGE TASCHENKONTUR: TASCHENRADIUS = 1.850E-03  
  
RKNC, EMODK, RKRC ?  
-0.03129,2.1E5,0.0005  
  
AUSSENBORDFUEHRUNG: RBRC, RBKC, BBC ?  
0.0323,0.032275,0.004  
  
RSOC OMSOC OMSOPC ?  
0.21,0,0  
  
          ARBEITSTITEL :  
(                )  
?NKI 55/25  
-----
```

Die Eingabedaten entnimmt man den Tafeln 16 und 17 und die berechneten Startzustände den *Bildern* 115 und 116.

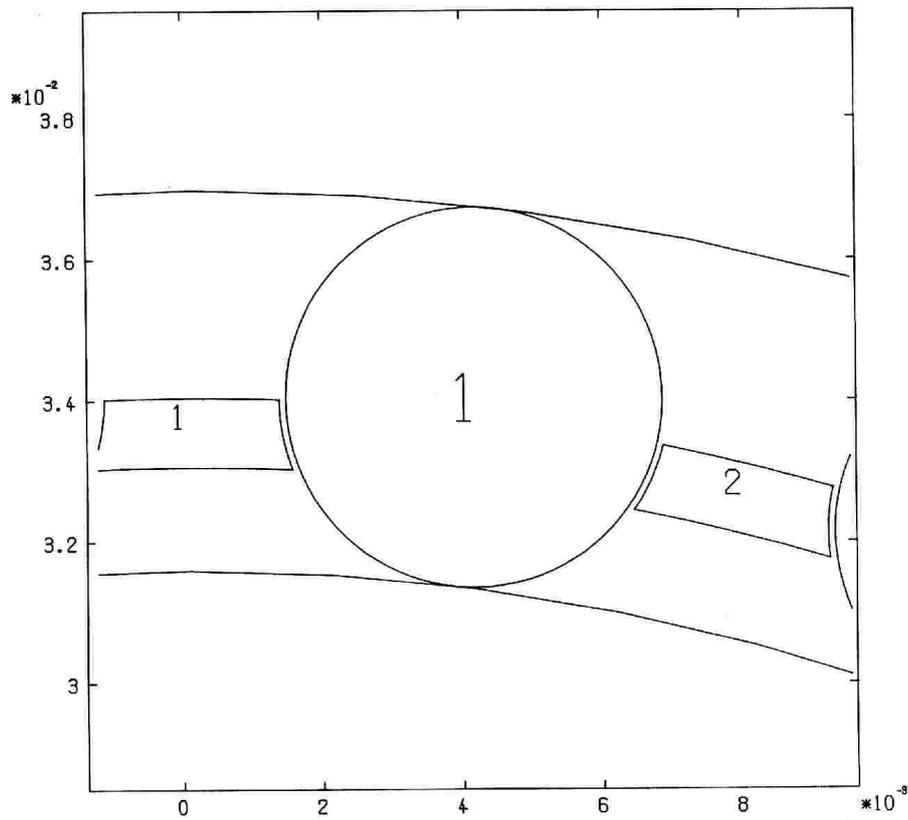
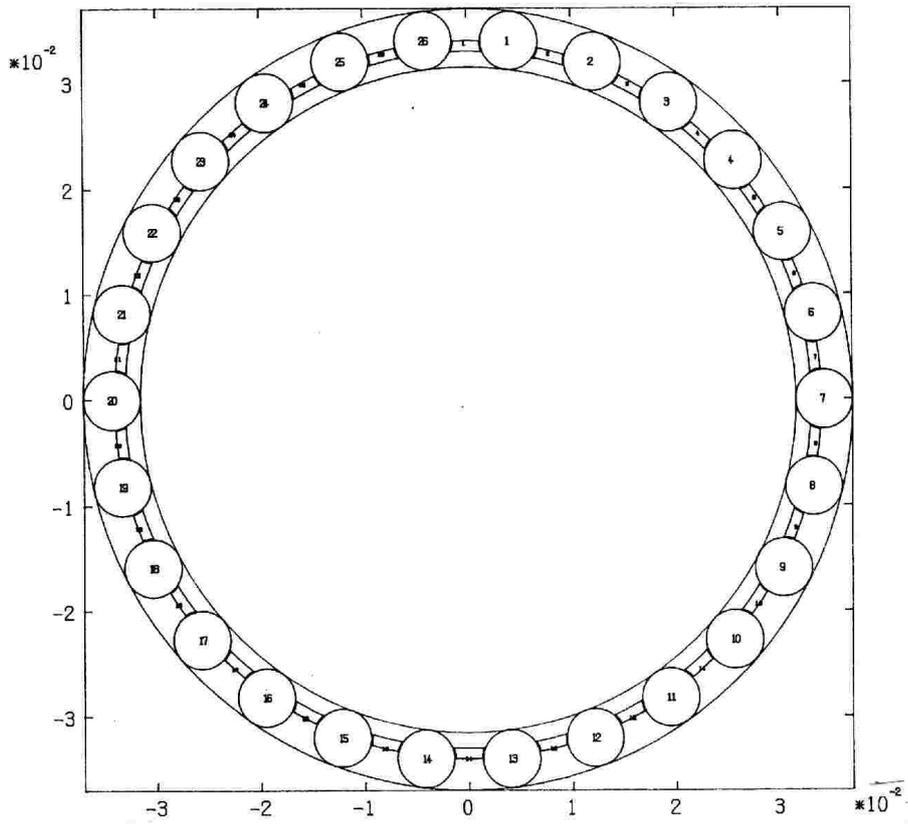


Bild 115: Startzustand des Lagers NA4911

Tafel 16: Inhalt der Datei AUS bei Lager NA4911

I							
I			I	START :	1987/03/03	21.23.42	I
I	NA4911		I	CPU-SEC	0.00		I
I			I	ENDE :	1987/03/03	21.23.50	I
I	-----						
I	G E O M E T R I E						
I	INNENRING	LAUFBAHRADIUS	RIC	0.031500	M		I
I		EXZENTRIZITAET	EIC	0.000000	MYM		I
I		EXZENTRIZITAETSWINKEL	BEIC	0.000000	GRAD		I
I	AUSSENRING	LAUFBAHRADIUS	RAC	0.037000	M		I
I		FUEHRUNGSBORDRADIUS	RBRC	0.035350	M		I
I		FUEHRUNGSORBREITE	BBC	0.006000	M		I
I		EXZENTRIZITAET	EAC	0.000000	MYM		I
I		EXZENTRIZITAETSWINKEL	BEAC	0.000000	GRAD		I
I	WAE LZK O E R P E R	RADIUS	RWC	0.002750	M		I
I		BREITE	BWC	0.018000	M		I
I		ANZAHL	NW	26	-		I
I	KAEFIG	AUSSENBORDGEFUEHRT					I
I		E-MODUL	EMODK	2.1000E+05	N/MM2		I
I		FUEHRUNGSRADIUS	RBKC	0.035300	M		I
I		AUSSEN RADIUS	RKAC	0.034000	M		I
I		INNEN RADIUS	RKIC	0.033000	M		I
I		MITTEN RADIUS	RKTC	0.034250	M		I
I		TASCHEN RADIUS	RTC	0.002850	M		I
I		STEGKANTEN RADIUS	RKRC	0.000500	M		I
I	PLANETENGETRIEBE	ACHSABSTAND	RSOC	0.210000	M		I
I	-----						
I	M A S S E N , - T R A E G H E I T S M O M E N T E						
I	WAE LZK O E R P E R	MASSE	MW	0.003500	KG		I
I		MASSENTRAE GHEITSMOMENT	THETA W	1.3300E-08	KG*M2		I
I	KAEFIG	MASSE	MK	0.029900	KG		I
I		MASSENTRAE GHEITSMOMENT	THETA K	3.4000E-05	KG*M2		I
I	-----						
I	K I N E M A T I K						
I	WINKELGESCHWINDIGKEIT	LAGERAUSSENRING	BEAPC	0.000000	1/S		I
I		LAGERINNENRING	BEIPC	0.000000	1/S		I
I		PLANETENRADTRAEGER	OMSOC	0.000000	1/S		I
I		KEIN LAUFBAHNWECHSEL					I
I	1. UMKEHRPUNKT	PLANETENRADTRAEGER	OMES1	0.000000	1/S		I
I	2. UMKEHRPUNKT	PLANETENRADTRAEGER	OMES2	0.000000	1/S		I
I	BESCHLEUNIGUNG	PLANETENRADTRAEGER	OMSOPC	0.000000	1/S2		I
I		FUEHRUNGSNORMALBESCHL.	AN	0.000000	G		I
I	-----						
I	O E L						
I	FVA-REFERENZOEL NR.3						I
I	TEMPERATUR	TOEL		70.000000	GRAD		I
I	VISKOSITAET	VOEL		26.000000	CSTK		I
I	-----						
I	B E L A S T U N G						
I	MITTLERE RESULTIERENDE LAGERKRAFT	RES		0.000000	N		I
I	MITTLERER KRAFTANGRIFFSWINKEL	GAMMA		0.000000	GRAD		I
I	LAGERSPIEL IN DER LASTZONE	SL		0.011176	MYM		I
I	MITTLERE LAGERSTEIFIGKEIT	LST		0.0000E-01	N/M		I
I	THEORETISCHE LASTZONE VON	BL1G		0.000000	GRAD		I
I		BIS	BL2G	0.000000	GRAD		I
I	-----						
I	V E R L U S T L E I S T U N G						
I	ZURUECKGELEGTER WINKEL (ROLLE 1)	B(1)		6.922874	GRAD		I
I	SCHLUPF (ROLLE 1) IN LAGERUMFANGSRICHTUNG	SCHB		0.000000	%		I
I	MITTLERE REIBLEISTUNG	PRMI		0.000000	W		I
I	MITTLERES REIBMOMENT	MRMI		0.000000	NM		I
I	GEMITTELT VON T=0.0000E-01 BIS 0.0000E-01						I
I	-----						
I	I S T E U E R G R O E S S E N						
I	ITERATIONSSCHRITTE	IZS		0	-		I
I	SCHRITTWEITENVERKLEINERUNGEN	IZV		0	-		I
I	SCHRITTWEITE	DT		VARIABEL			I
I	ZEITBEREICH	T		0.000000	S		I
I	ZEITSCHRITTE AUF DATEI	III		0	-		I
I	-----						
I	-----RLSI V5.7-----						

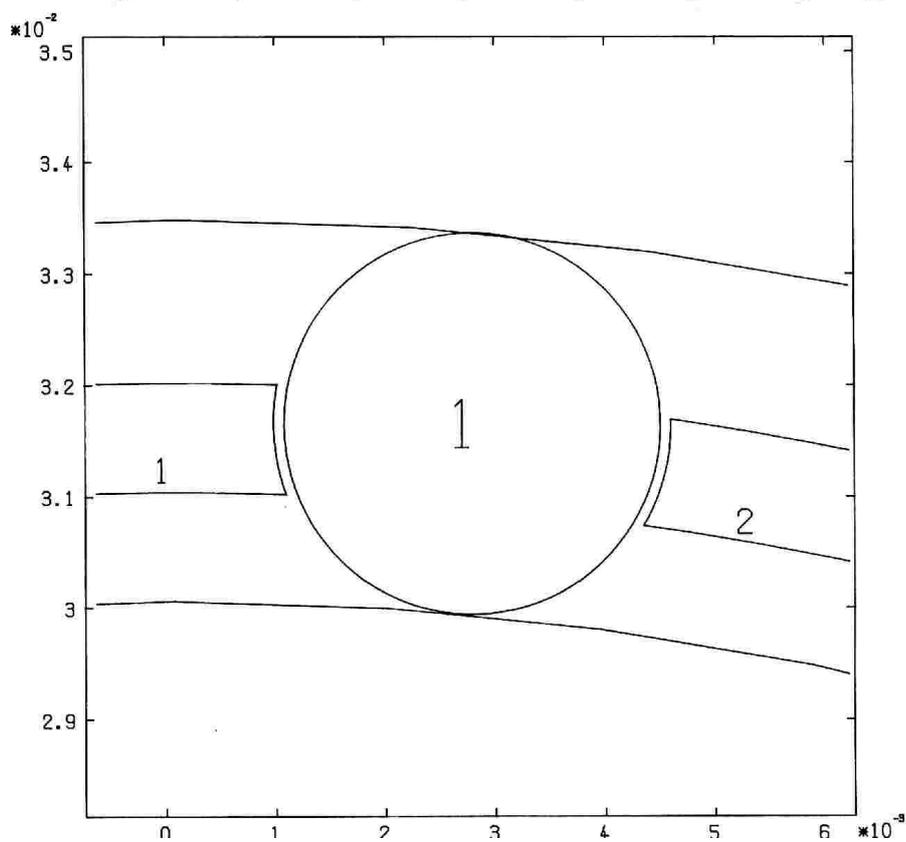
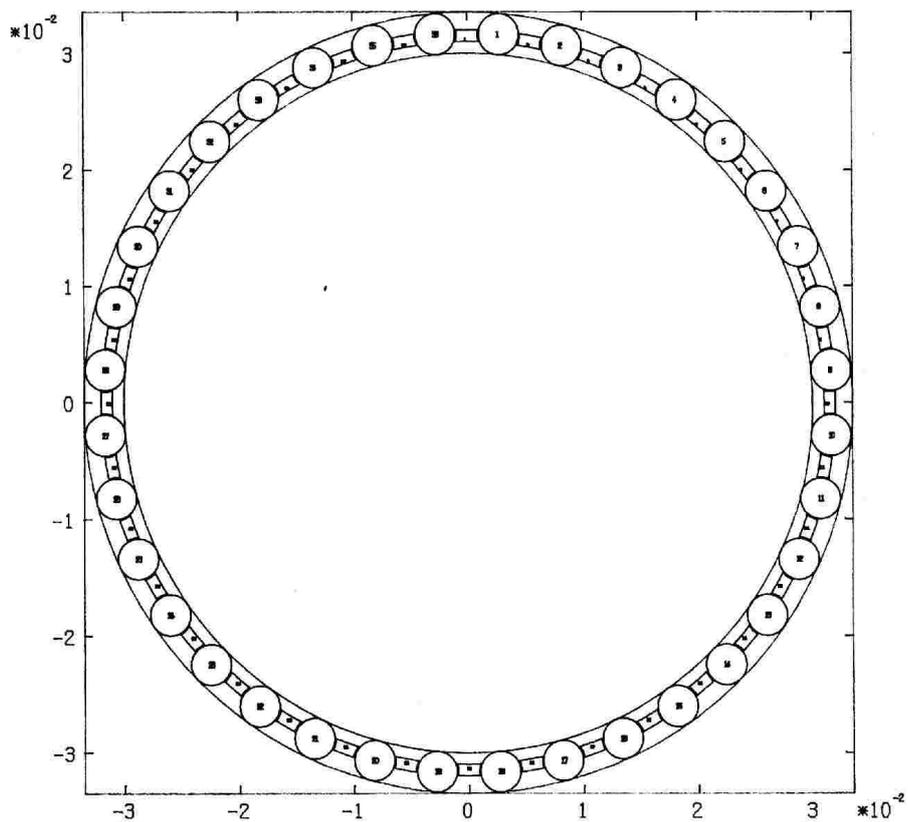


Bild 116: Startzustand des Lagers NKI55/25

Tafel 17: Inhalt der Datei AUS bei Lager NKI55/25

I		I	START :	1987/03/03	21.24.38	I	
I	NKI 55/25	I	CPU-SEC	0.00		I	
I		I	ENDE :	1987/03/03	21.24.47	I	

I	G E O M E T R I E					I	
I	INNENRING	LAUFBAHRADIUS	RIC	0.030000	M	I	
I		EXZENTRIZITAET	EIC	0.000000	MYM	I	
I		EXZENTRIZITAETSWINKEL	BEIC	0.000000	GRAD	I	
I	AUSSENRING	LAUFBAHRADIUS	RAC	0.033500	M	I	
I		FUEHRUNGSBORDRADIUS	RBRC	0.032300	M	I	
I		FUEHRUNGSBORBREITE	BBC	0.004000	M	I	
I		EXZENTRIZITAET	EAC	0.000000	MYM	I	
I		EXZENTRIZITAETSWINKEL	BEAC	0.000000	GRAD	I	
I	WAE LZK O E R P E R	RADIUS	RWC	0.001750	M	I	
I		BREITE	BWC	0.018000	M	I	
I		ANZAHL	NW	36	-	I	
I	KA E F I G	AUSSENBORDEG FUEHRT				I	
I		E-MODUL	EMODK	2.1000E+05	N/MM2	I	
I		FUEHRUNGSRADIUS	RBKC	0.032275	M	I	
I		AUSSENRADIUS	RKAC	0.032000	M	I	
I		INNENRADIUS	RKIC	0.031000	M	I	
I		MITTENRADIUS	RKTC	0.031750	M	I	
I		TASCHENRADIUS	RTC	0.001850	M	I	
I		STEGKANTENRADIUS	RKRC	0.000500	M	I	
I	PLANETENGETRIEBE	ACHSABSTAND	RSOC	0.210000	M	I	

I	M A S S E N , - T R A E G H E I T S M O M E N T E					I	
I	WAE LZK O E R P E R	MASSE	MW	0.001420	KG	I	
I		MASSENTRAE GHEITSMOMENT	THETA W	2.1700E-09	KG*M2	I	
I	KA E F I G	MASSE	MK	0.026400	KG	I	
I		MASSENTRAE GHEITSMOMENT	THETA K	2.6000E-05	KG*M2	I	

I	K I N E M A T I K					I	
I	WINKELGESCHWINDIGKEIT	LAGERAUSSENRING	BEAPC	0.000000	1/S	I	
I		LAGERINNENRING	BEIPC	0.000000	1/S	I	
I		PLANETENRADTRAEGER	OMSOC	0.000000	1/S	I	
I		KEIN LAUFBAHNWECHSEL				I	
I	1. UMKEHRPUNKT	PLANETENRADTRAEGER	OMES1	0.000000	1/S	I	
I	2. UMKEHRPUNKT	PLANETENRADTRAEGER	OMES2	0.000000	1/S	I	
I	BESCHLEUNIGUNG	PLANETENRADTRAEGER	OMSOPC	0.000000	1/S2	I	
I		FUEHRUNGSNORMALBESCHL. AN		0.000000	G	I	

I	O E L					I	
I	FVA-REFERENZOEL NR.3					I	
I	TEMPERATUR	TOEL		70.000000	GRAD	I	
I	VISKOSITAET	VOEL		26.000000	CSTK	I	

I	B E L A S T U N G					I	
I	MITTLERE RESULTIERENDE LAGERKRAFT	RES		0.000000	N	I	
I	MITTLERER KRAFTANGRIFFSWINKEL	GAMMA		0.000000	GRAD	I	
I	LAGERSPIEL IN DER LASTZONE	SL		0.001397	MYM	I	
I	MITTLERE LAGERSTEIFIGKEIT	LST		0.0000E-01	N/M	I	
I	THEORETISCHE LASTZONE VON	BL1G		0.000000	GRAD	I	
I		BIS		0.000000	GRAD	I	

I	V E R L U S T L E I S T U N G					I	
I	ZURUECKGELEGTER WINKEL (ROLLE 1)	B (1)		4.999842	GRAD	I	
I	SCHLUPF (ROLLE 1) IN LAGERUMFANGSRICHTUNG	SCHB		0.000000	%	I	
I	MITTLERE REIBLEISTUNG	PRMI		0.000000	W	I	
I	MITTLERES REIBMOMENT	MRMI		0.000000	NM	I	
I	GEMITTELT VON T=0.0000E-01 BIS 0.0000E-01					I	

I	S T E U E R G R O E S S E N					I	
I	ITERATIONSSCHRITTE	IZS		0	-	I	
I	SCHRITTWEITENVERKLEINERUNGEN	IZV		0	-	I	
I	SCHRITTWEITE	DT		VARIABEL		I	
I	ZEITBEREICH	T		0.000000	S	I	
I	ZEITSCHRITTE AUF DATEI	III		0	-	I	

I	-----RLSI V5.7-----						I

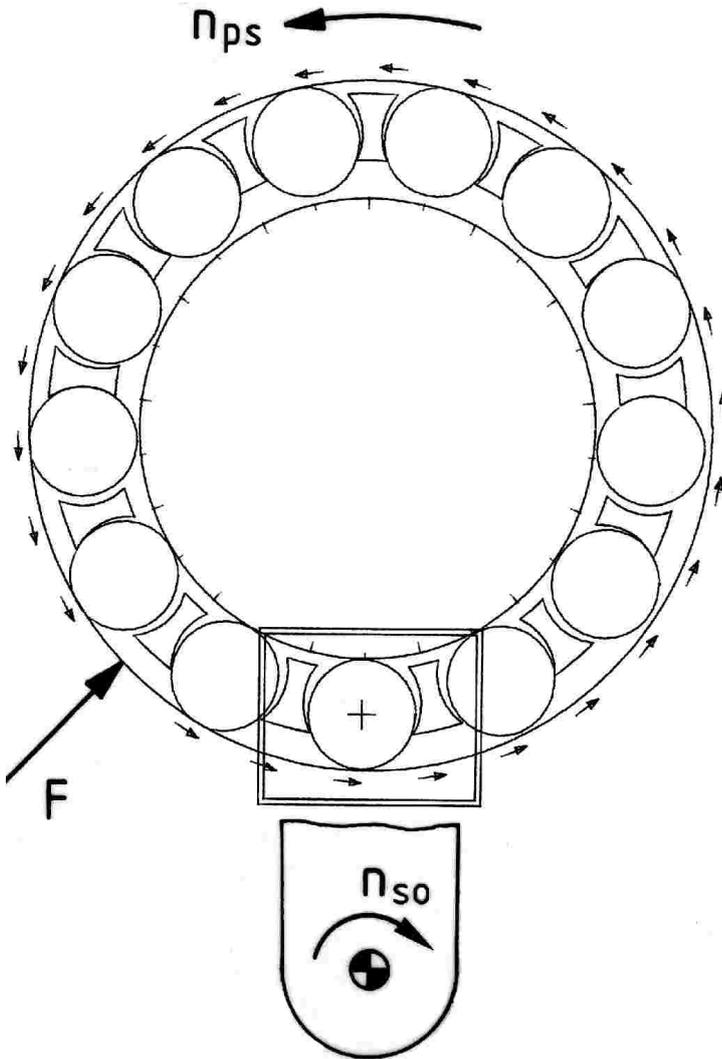


Bild 117: Lager mit vergrößertem Spiel

Eine Simulationsrechnung mit vergrößerten Lager- und Taschenspielen (Bild 117) gibt einen Einblick in das dynamische Verhalten von Planetenrad - Wälzlagern. Während eines berechneten Umlaufes des Wälzkörperpaketes wurde der Lagerzustand 600 mal auf Datei geschrieben und mit diesen Werten Ausschnitte des Lagers gezeichnet, die als Bildfolge die Bewegungsabläufe im Lager verdeutlichen. Die Bilder 118 bis 153 zeigen daraus 36 "Momentaufnahmen" eines Wälzkörpers nach jeweils gleichen Zeitabständen. Man erkennt das Anlegen des Wälzkörpers am Innenring auf der dem Getriebemittelpunkt zugewandten (Bilder 118 bis 126) und am Außenring auf der abgewandten Seite (Bilder 129 bis 147). Außerhalb der Lastzone erfolgt der in den Bildern 126 bis 129 dargestellte Laufbahnwechsel. Das Abstützen des wälzkörpergeführten Käfigs wird in den Bildern 137

bis 141 deutlich. Ebenfalls erkennt man das "Kippen" (*Bild 123*) und die "Taschenlage" (*Bild 127*) des Wälzkörpers. Aus den Drehwinkeldifferenzen des Wälzkörpers kann man auf die Zunahme der Eigenrotation beim Einlauf in die Lastzone und das Abbremsen während der Stützung des Käfigs schließen.

Bilder 118 bis 155: Umlauf eines Wälzkörpers im Lager

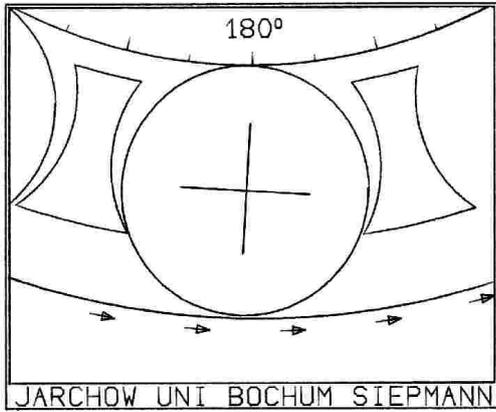


Bild 118:

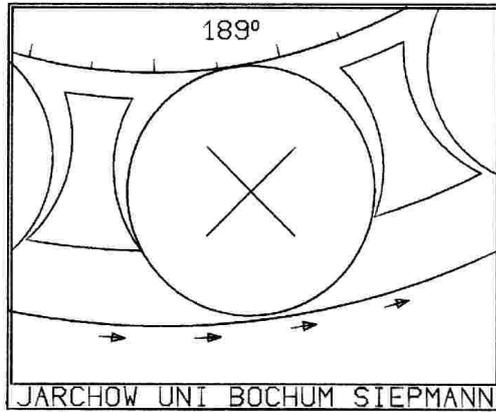


Bild 119:

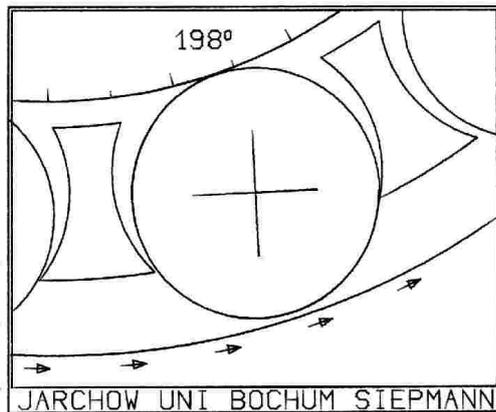


Bild 120:

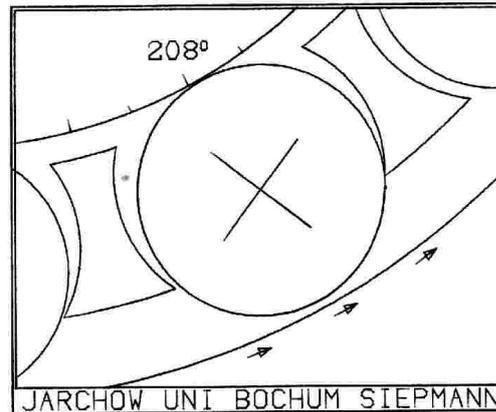


Bild 121:

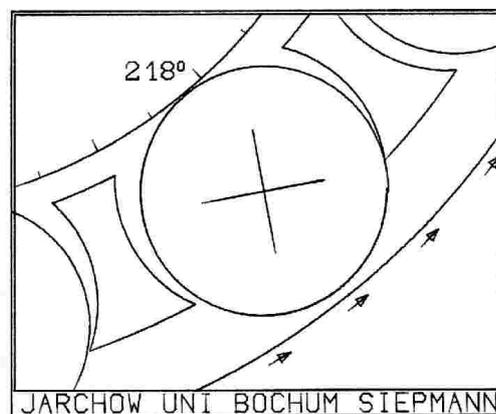


Bild 122:

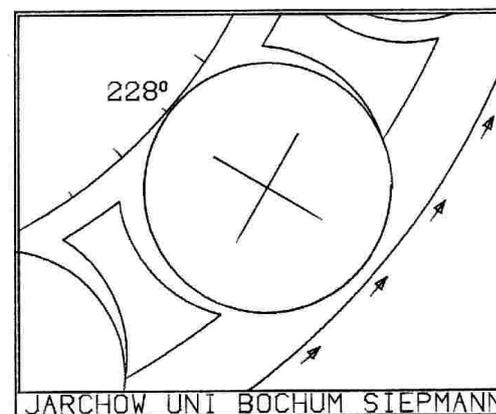


Bild 123:

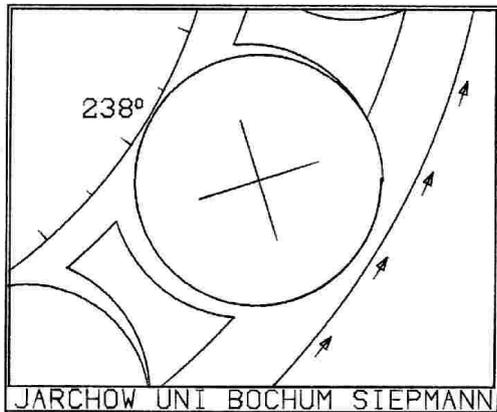


Bild 124:

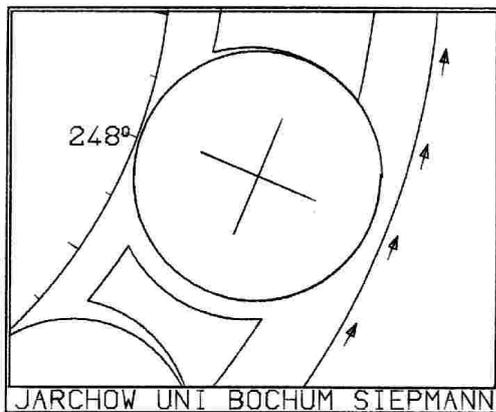


Bild 125:

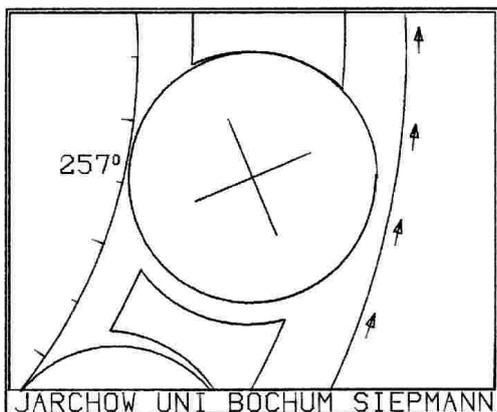


Bild 126:

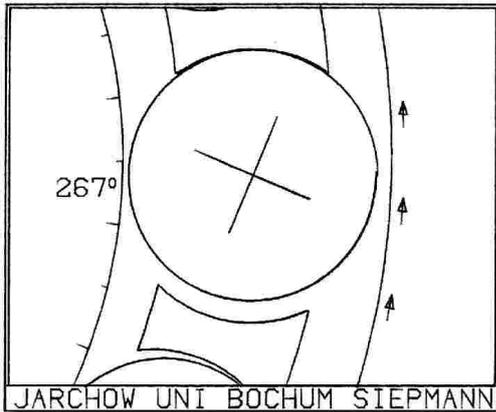


Bild 127:

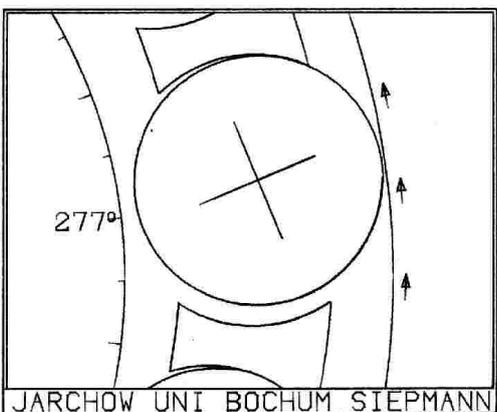


Bild 128:

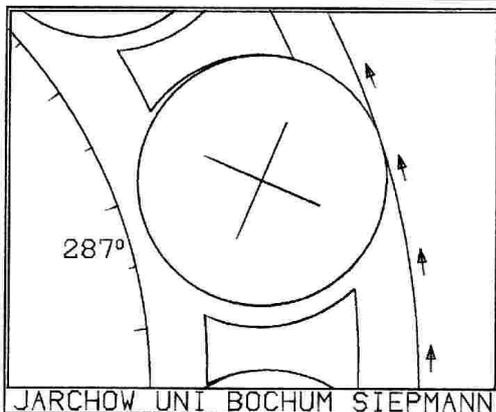


Bild 129:

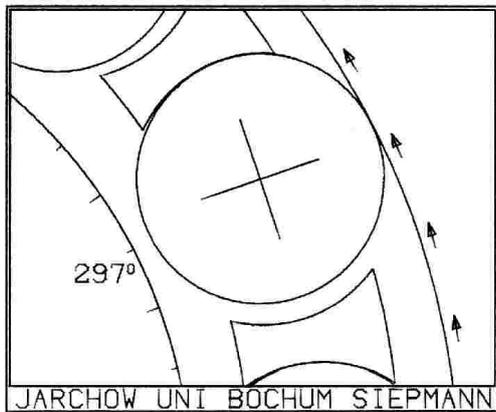


Bild 130:

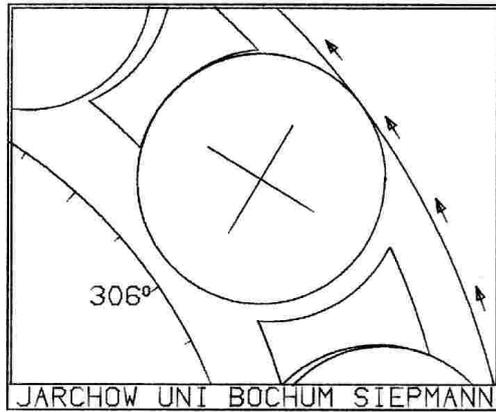


Bild 131:

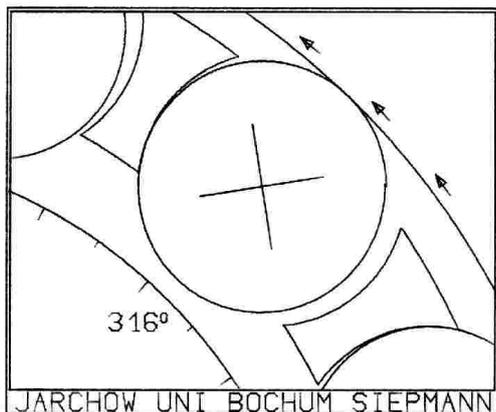


Bild 132:

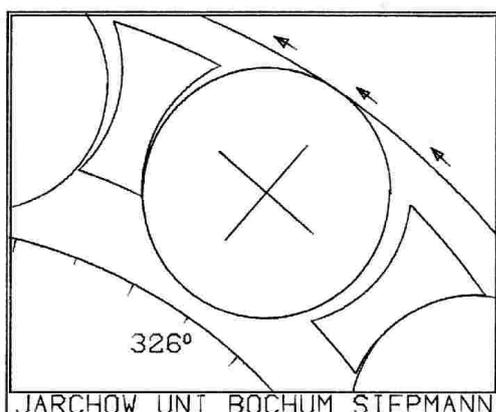


Bild 133:

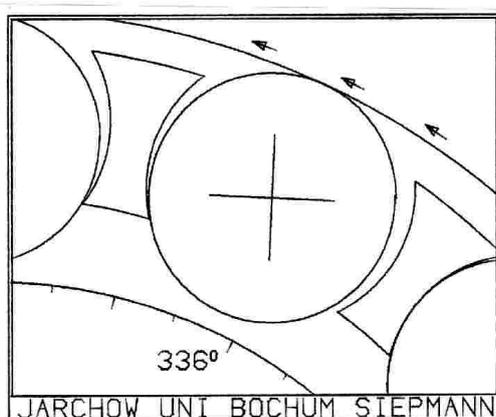


Bild 134:

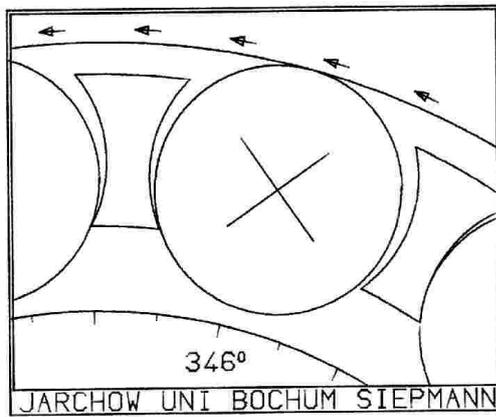


Bild 135:

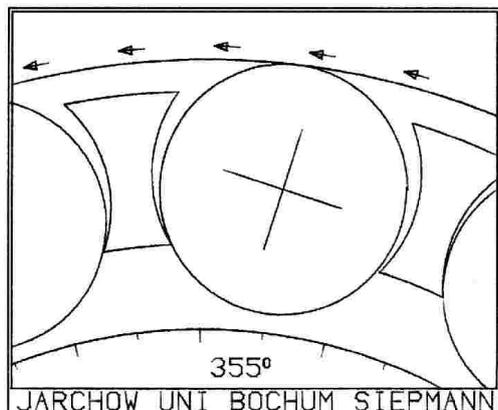


Bild 136:

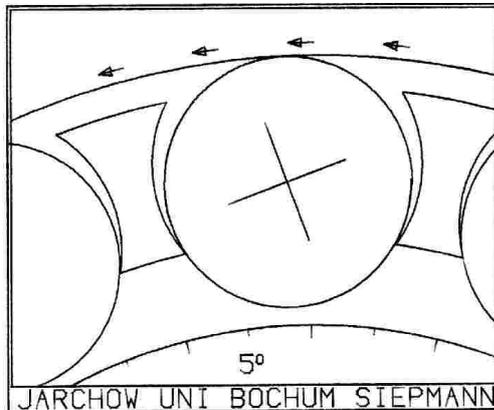


Bild 137:

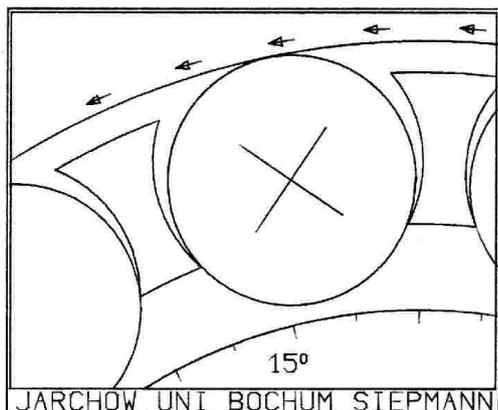


Bild 138:

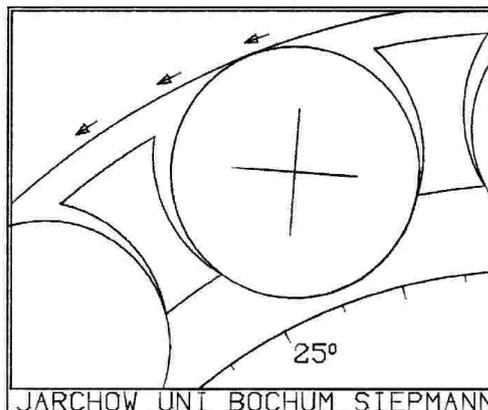


Bild 139:

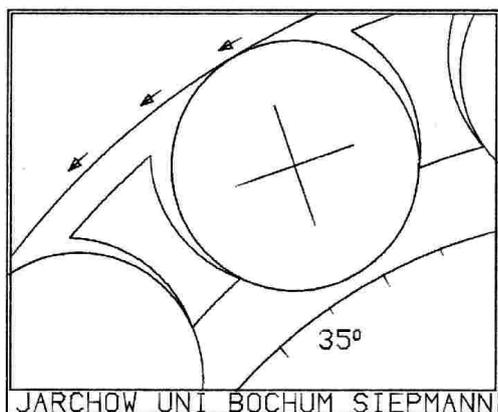


Bild 140:

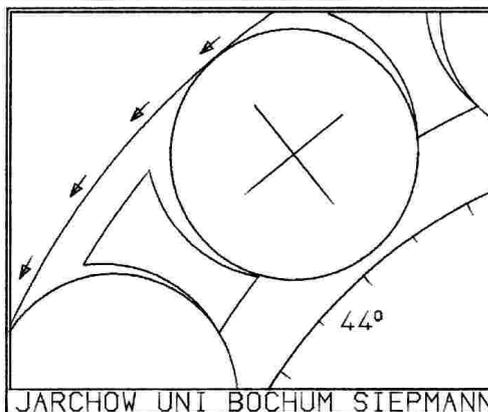


Bild 141:

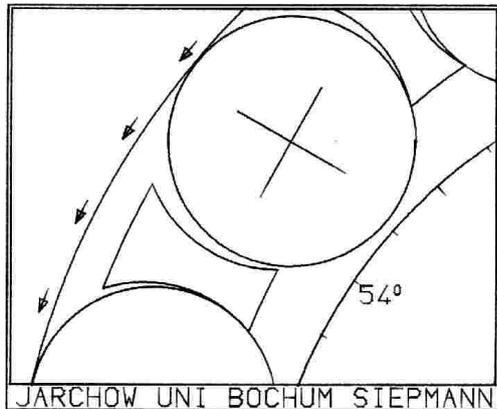


Bild 142:

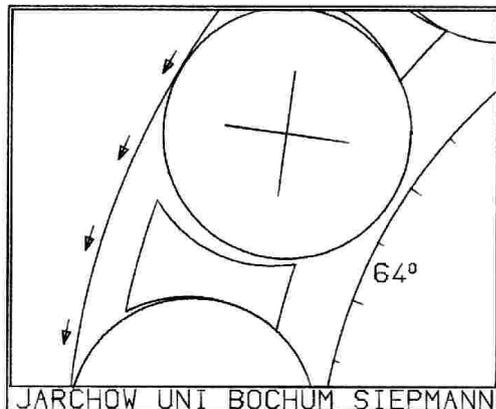


Bild 143:

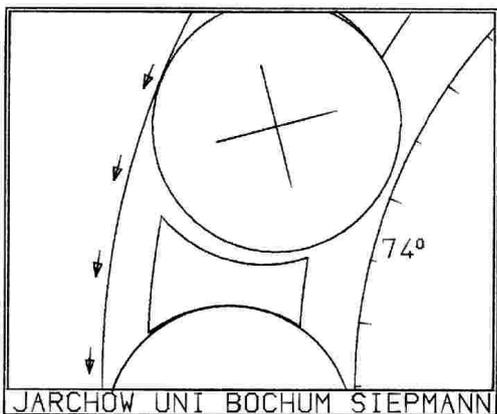


Bild 144:

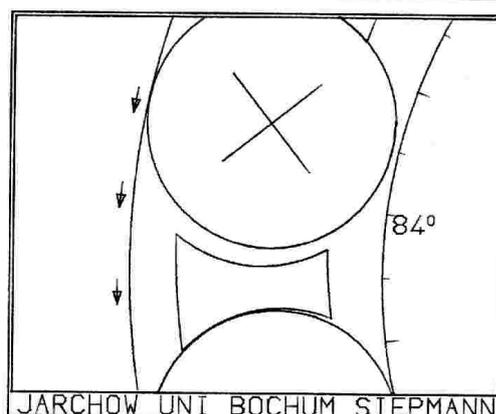


Bild 145:

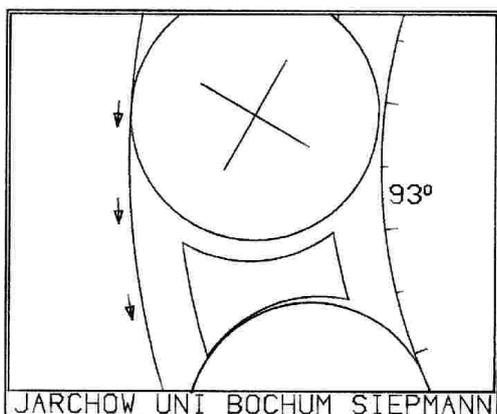


Bild 146:

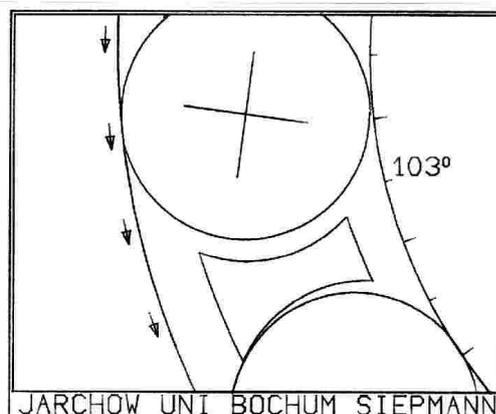


Bild 147:

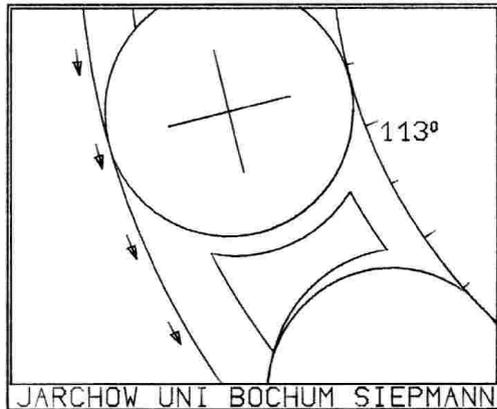


Bild 148:

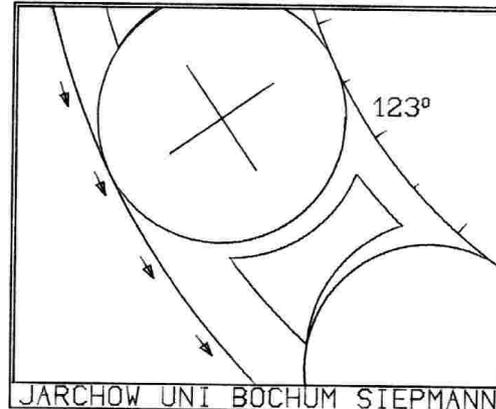


Bild 149:

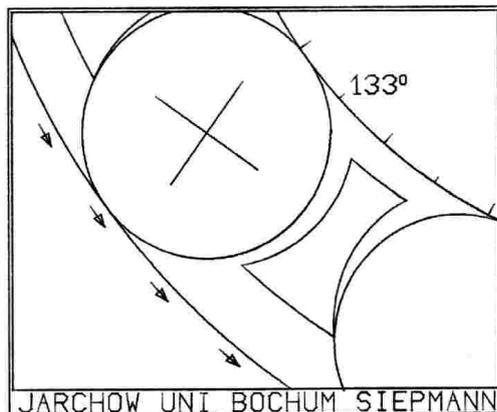


Bild 150:

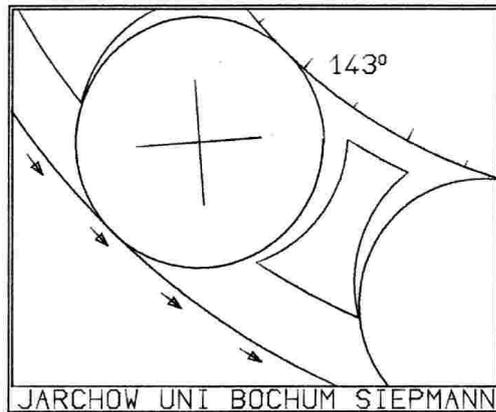


Bild 151:

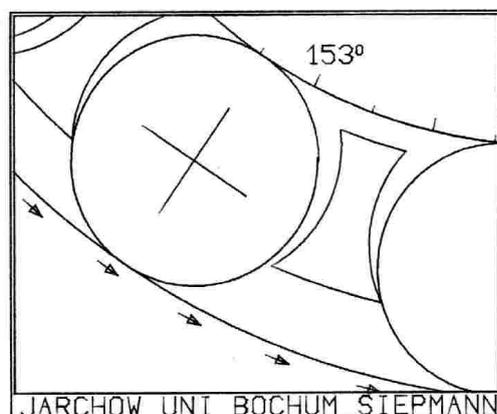


Bild 152:

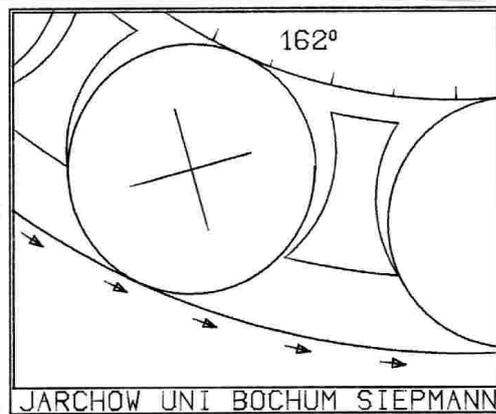


Bild 153:

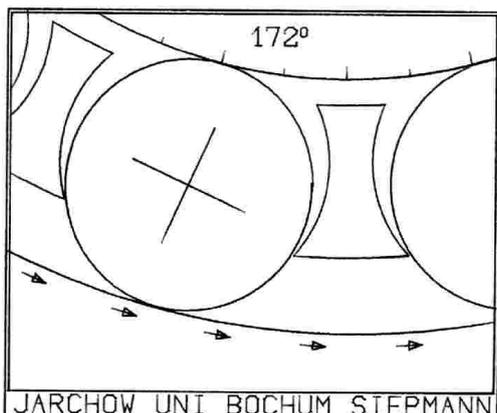


Bild 154:

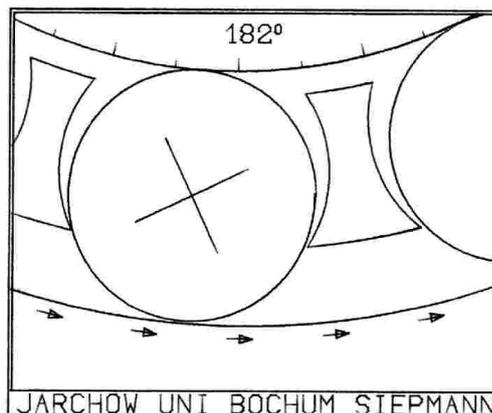


Bild 155:

Tafel 18: Ergebnisse der Beispielrechnung

I		I	START : 1987/04/06 10.57.34	I	
I	2309 MPA / I3-a1	I	CPU-SEC 66584.	I	
I		I	ENDE : 1987/04/07 06.34.14	I	

I	G E O M E T R I E				I
I	INNENRING	LAUFBAHRADIUS	RIC	0.029240 M	I
I		EXZENTRIZITAET	EIC	0.000000 MYM	I
I		EXZENTRIZITAETSWINKEL	BEIC	0.000000 GRAD	I
I	AUSSENRING	LAUFBAHRADIUS	RAC	0.044260 M	I
I		FUEHRUNGSBORDRADIUS	RBRC	0.041900 M	I
I		FUEHRUNGSBORBREITE	BBC	0.013132 M	I
I		EXZENTRIZITAET	EAC	32.000000 MYM	I
I		EXZENTRIZITAETSWINKEL	BEAC	69.900848 GRAD	I
I	WAEZKOERPER	RADIUS	RWC	0.007500 M	I
I		BREITE	BWC	0.024000 M	I
I		ANZAHL	NW	12 -	I
I	KAEFIG	AUSSENBORDGEFUEHRT			I
I		E-MODUL	EMODK	9.6000E+04 N/MM2	I
I		FUEHRUNGSRADIUS	RBKC	0.041650 M	I
I		AUSSENADIUS	RKAC	0.041650 M	I
I		INNENRADIUS	RKIC	0.035250 M	I
I		HALBE TASCHENBREITE	RTC	0.007700 M	I
I	PLANETENGETRIEBE	ACHSABSTAND	RSOC	0.210000 M	I

I	M A S S E N , - T R A E G H E I T S M O M E N T E				I
I	WAEZKOERPER	MASSE	MW	0.031215 KG	I
I		MASSENTRAEGHEITSMOMENT	THETA W	8.7780E-07 KG*M2	I
I	KAEFIG	MASSE	MK	0.233000 KG	I
I		MASSENTRAEGHEITSMOMENT	THETA K	3.4000E-04 KG*M2	I

I	K I N E M A T I K				I
I	WINKELGESCHWINDIGKEIT	LAGERAUSSENRING	BEAPC	167.550003 1/S	I
I		LAGERINNENRING	BEIPC	0.000000 1/S	I
I		PLANETENRADTRAEGER	OMSOC	120.699997 1/S	I
I		LAUFBAHNWECHSEL			I
I	1. UMKEHRPUNKT	PLANETENRADTRAEGER	OMES1	-29.758448 1/S	I
I	2. UMKEHRPUNKT	PLANETENRADTRAEGER	OMES2	72.562279 1/S	I
I	BESCHLEUNIGUNG	PLANETENRADTRAEGER	OMSOPC	0.000000 1/S2	I
I		FUEHRUNGSNORMALBESCHL. AN		311.863647 G	I

I	O E L				I
I	FVA-REFERENZOEEL NR.3				I
I	TEMPERATUR	TOEL	70.000000	GRAD	I
I	VISKOSITAET	VOEL	26.000000	CSTK	I

I	B E L A S T U N G				I
I	MITTLERE RESULTIERENDE LAGERKRAFT	RES	10915.156250	N	I
I	MITTLERER KRAFTANGRIFFSWINKEL	GAMMA	71.821770	GRAD	I
I	LAGERSPIEL IN DER LASTZONE	SL	-11.999847	MYM	I
I	MITTLERE LAGERSTEIFIGKEIT	LST	9.0961E+08	N/M	I
I	THEORETISCHE LASTZONE VON	BL1G	198.563919	GRAD	I
I	BIS	BL2G	301.237793	GRAD	I

```

I V E R L U S T L E I S T U N G
I ZURUECKGELEGTER WINKEL (ROLLE 1)          B (1)      56.569901 GRAD  I
I MITTLERER SCHLUPF IN LAGERUMFANGSRICHTUNG SMERK      -0.486901 %    I
I MITTLERE REIBLEISTUNG                    PRMI      -316.208668 W   I
I MITTLERES REIBMOMENT                    MRMI      -1.887249 NM   I
I GEMITTELT VON T=0.0000E-00 BIS 1.0000E-02
I-----I
I S T E U E R G R O E S S E N
I ITERATIONSSCHRITTE                      IZS       6995          -    I
I SCHRITTWEITENVERKLEINERUNGEN          IZV       370           -    I
I SCHRITTWEITE                            DT        VARIABEL      I
I ZEITBEREICH                             T         0.010000 S   I
I ZEITSCHRITTE AUF DATEI                 III       150           -    I
I-----RLSI V5.8-----I

```

Die folgenden *Bilder* 156 bis 167 sowie Tafel 18 enthalten die Ergebnisse einer Simulationsrechnung für das Lager 2309 MPA mit außenbordgeführten Messingmassivkäfig und gerader Taschenkontur. Die Lagerrelativdrehzahl n_{ps} betrug 1600 min^{-1} und die Führungsnormalbeschleunigung a_n $312g$ bei einer Drehzahl n_{s0} des Planetenradträgers von 1150 min^{-1} und einem Achsabstand im Getriebe von 210 mm . Die positiven Drehrichtungen von n_{ps} und n_{s0} entsprechen dem Betriebsfall a1 nach *Bild 3*. Die Verschiebung des Außenringes um $32 \mu\text{m}$ führte bei einem Lagerspiel von $40 \mu\text{m}$ zu einer Lagerkraft von 10000 N .

Die *Bilder* 157 bis 160 geben die berechneten Geschwindigkeiten und Lagen der Wälzkörper aufgetragen über dem Winkel β in dem geführten Polarkoordinatensystem nach *Bild 18* wieder. Während der Simulationsrechnung bewegten sich die Wälzkörpermittelpunkte um ungefähr 60° in Lagerumfangsrichtung, dies entspricht zwei Wälzkörperteilungen.

In *Bild 157* erreicht die Radialgeschwindigkeit \dot{r} nach Gleichung (55) ihre höchsten Werte zwischen $\beta = 2 \text{ rad}(115^\circ)$ und $\beta = 2.6 \text{ rad}(150^\circ)$. In diesem Bereich wechselt der Wälzkörper über die Käfigtasche von der äußeren zur inneren Laufbahn. In der Lastzone von $\beta = 3.5$ bis $\beta = 5.3 \text{ rad}$ treten die geringsten Geschwindigkeitsänderungen auf, da die Rollkörper hier durch die hohe Pressung auf eine definierte Kurvenbahn gezwungen werden. Dieser Effekt läßt sich auch bei den Winkelgeschwindigkeiten $\dot{\beta}$ und $\dot{\alpha}$ in den *Bildern* 158 und 159 beobachten. Die starken Schwankungen von $\dot{\beta}$ nach Gleichung (57) sind auf Stöße bei Berührung mit den Käfigstegen zurückzuführen. Die dabei auftretenden Reibkräfte bremsen die Wälzkörper in ihrer Eigenrotation $\dot{\alpha}$ nach Gleichung (59) allmählich ab, bis sie beim Einlauf in die Lastzone wieder auf den ursprünglichen Wert beschleunigt werden. Der Bahnradius r der Rollkörpermittelpunkte nach Gleichung (56) folgt bei der Berührung mit dem exzentrischen Außenring einem sinusförmigen Verlauf, während er bei der Anlage am Innenring einen konstanten Wert annimmt (*Bild 160*).

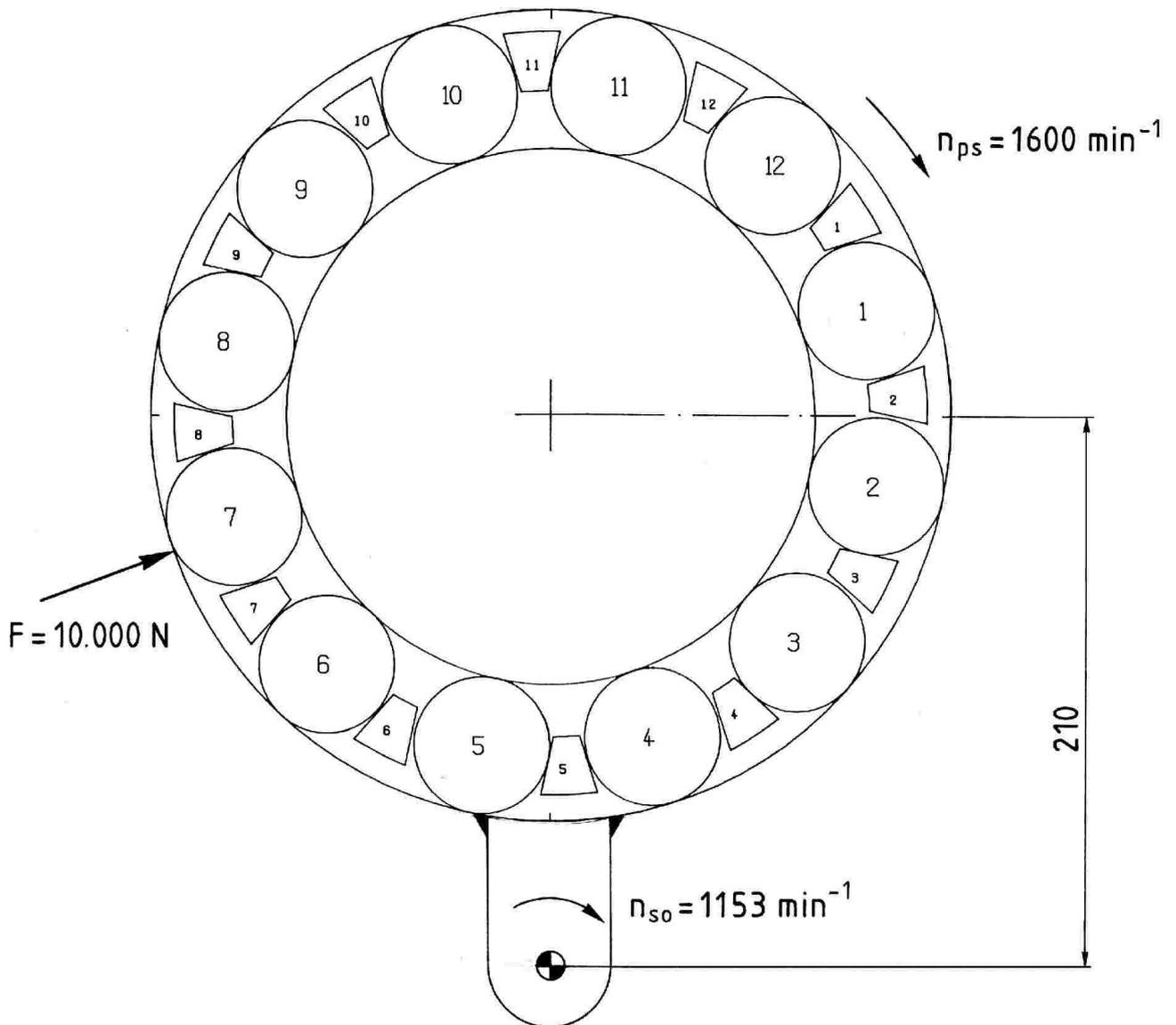


Bild 156: Betriebsdaten des Lagers 2309 MPA in der Beispielrechnung

Der Käfig verlagert sich infolge der Führungsbeschleunigung zu der dem Getriebemittelpunkt abgewandten Seite des Lagers und legt sich dort an den Führungsbord an (Bild 161). Die dabei entstehenden Stützkkräfte verformen den Käfig entsprechend Bild 162. Trägt man wie in Bild 163 die Radialverformungen der Käfigstege über der Zeit auf, so erkennt man einen gedämpften Schwingungsvorgang, der durch die Stützkkräfte am Führungsbord angeregt wird. Die Bilder 164 bis 166 zeigen die radialen und tangentialen Verformungen sowie die Verdrehungen der Käfigstege aufgetragen über der Lagerkoordinate β . Die den Grundkurven überlagerten hochfrequenten Anteile entstehen durch die Stöße zwischen Rollkörpern und Stegen. Dabei erfolgt auch eine Änderung der Käfig - Winkelgeschwindigkeit $\dot{\alpha}_k$ nach Gleichung (64). Bild 167 gibt den Verlauf dieser Größe über der

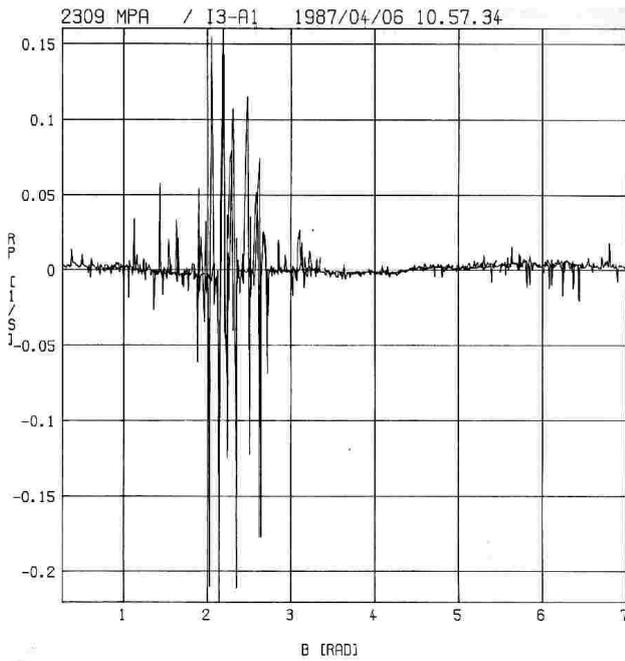


Bild 157: Radialgeschwindigkeit \dot{r} nach Gl.(55) aufgetragen über dem Lagewinkel β in *rad*

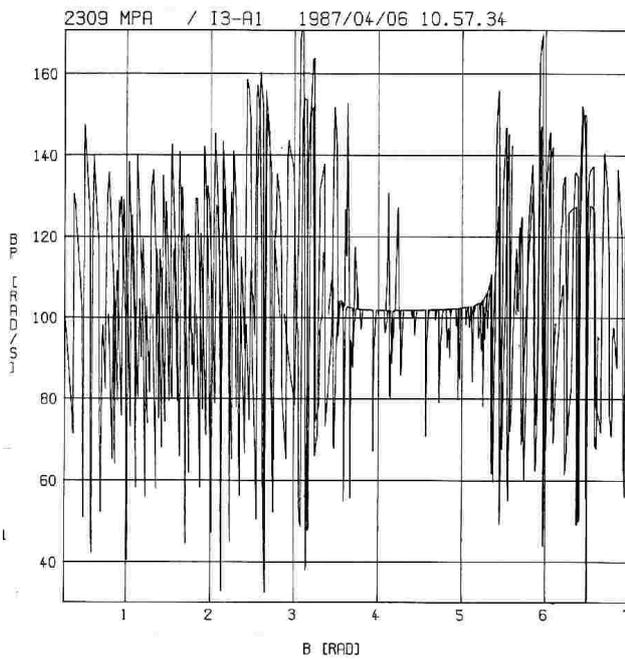


Bild 158: Winkelgeschwindigkeit $\dot{\beta}$ nach Gl.(57) aufgetragen über dem Lagewinkel β in *rad*

Zeit wieder.

[14] enthält weitere Beispielrechnungen für ein Lager NJ309 mit Kunststoffkäfig und kreisförmiger Taschenkontur.

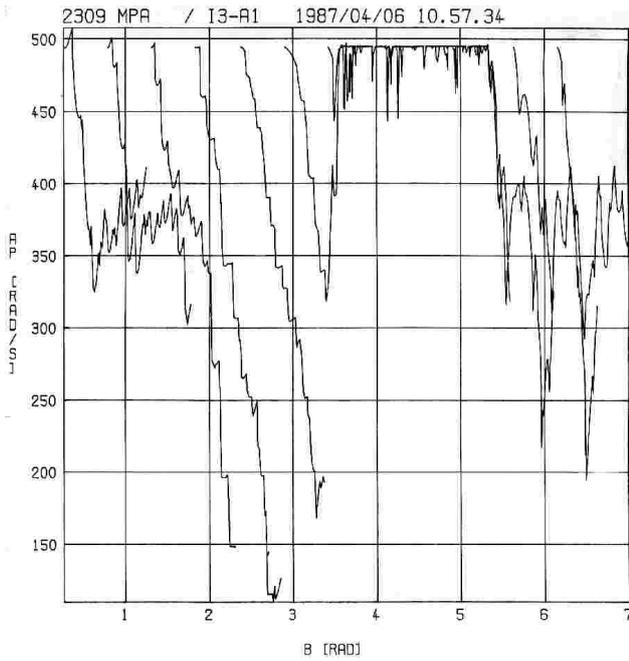


Bild 159: Winkelgeschwindigkeit $\dot{\alpha}$ nach Gl.(59) aufgetragen über dem Lagewinkel β in rad

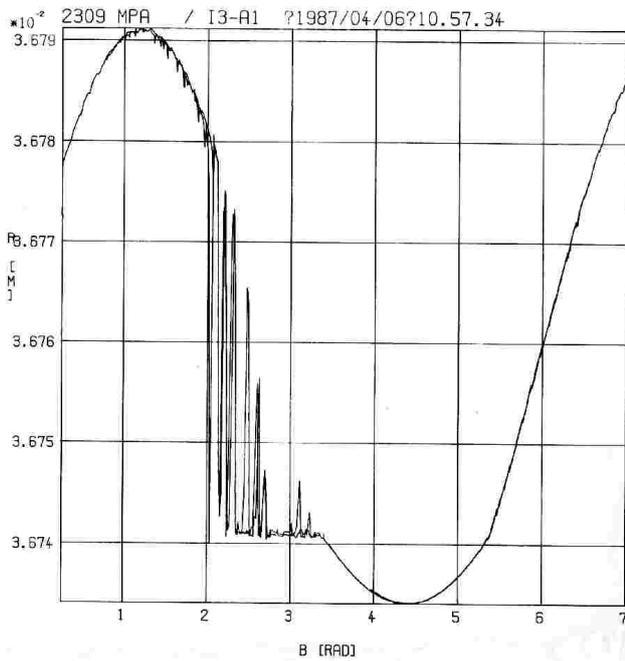


Bild 160: Bahnradius r nach Gl.(56) aufgetragen über dem Lagewinkel β in rad

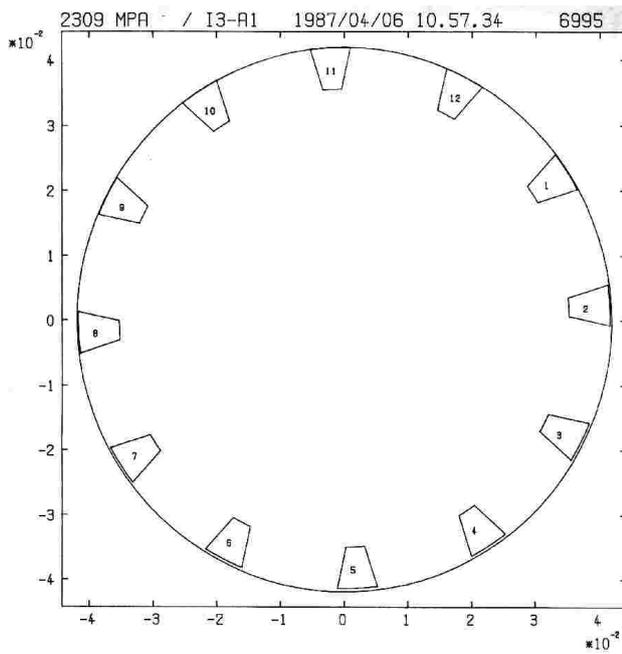


Bild 161: Bordführung des Käfigs

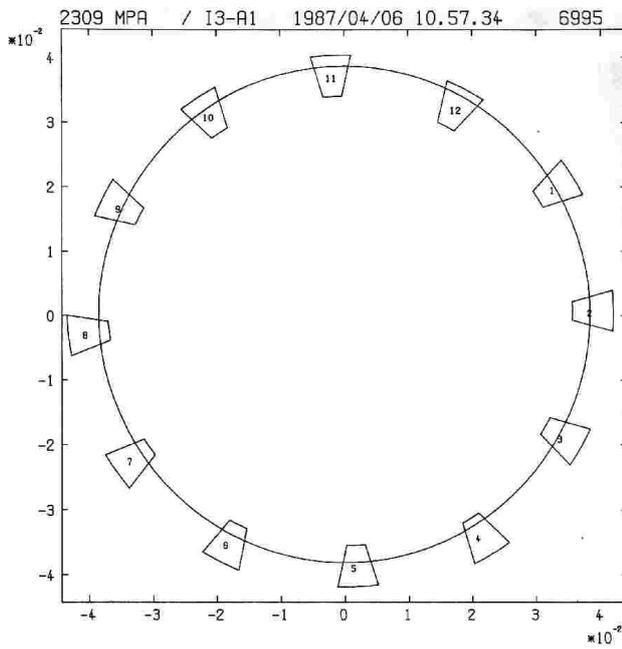


Bild 162: Käfigverformung, Vergrößerung 100

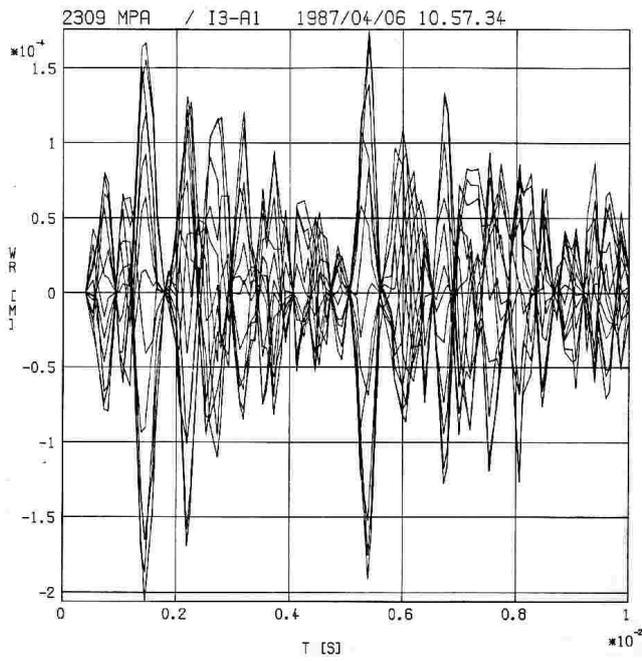


Bild 163: Radiale Verformungen der Käfigstege in m aufgetragen über der Zeit t in s

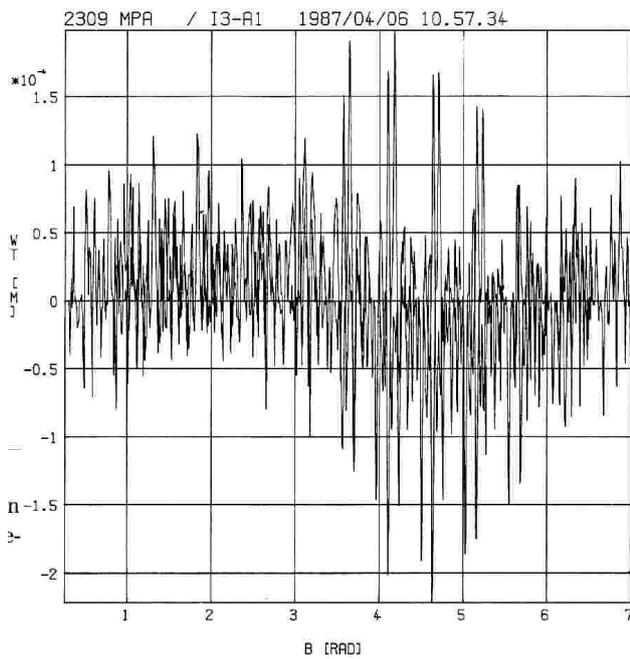


Bild 165: Radiale Verformungen der Käfigstege in m aufgetragen über dem Lagewinkel β in rad

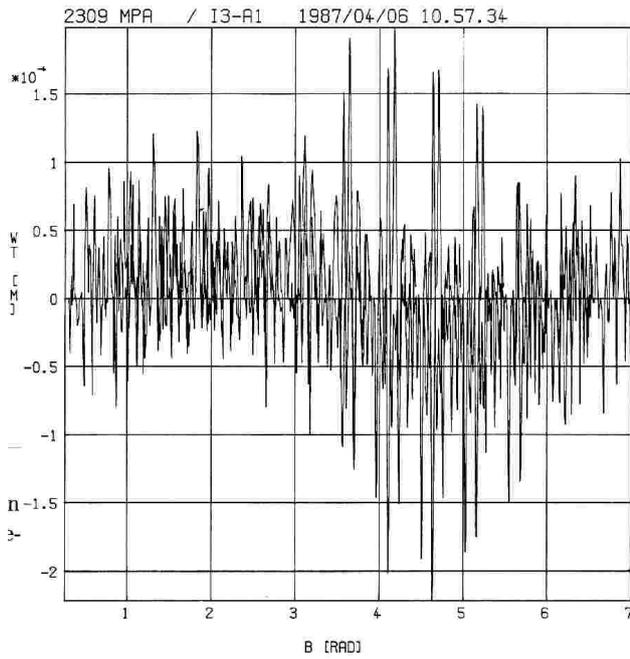


Bild 165: Tangentiale Verformungen der Käfigstege in m aufgetragen über dem Lagewinkel β in rad

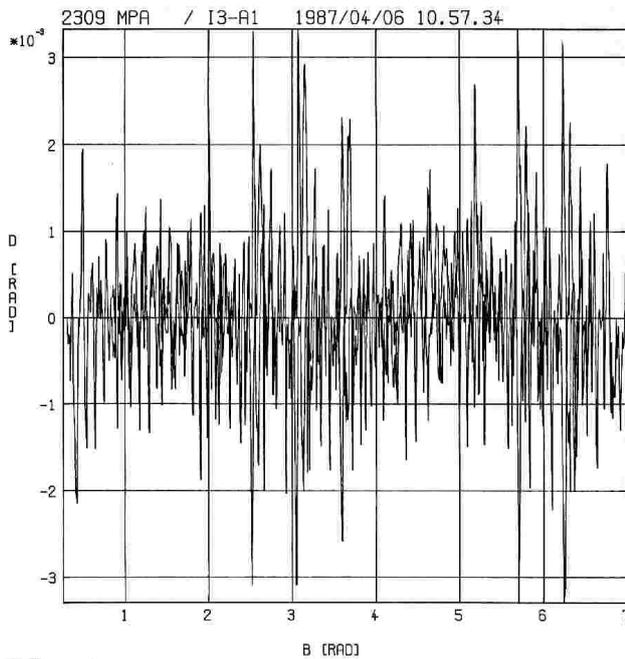


Bild 166: Verdrehungen der Käfigstege in rad aufgetragen über dem Lagewinkel β in rad

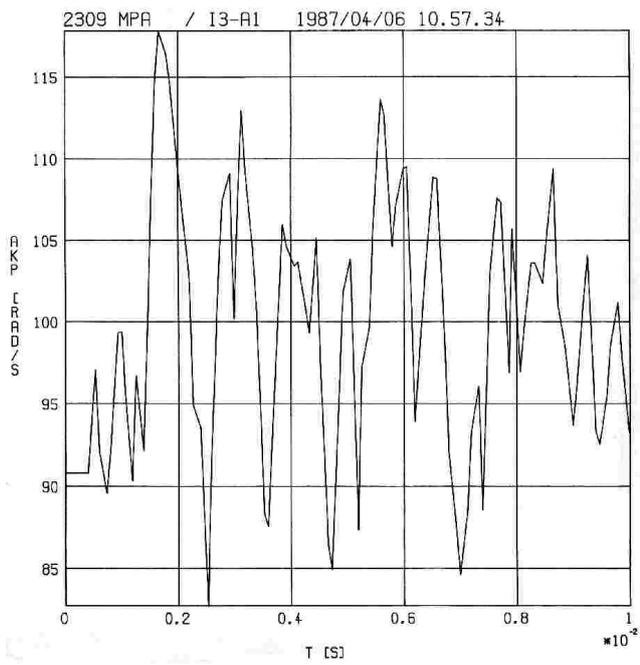


Bild 167: Winkelgeschwindigkeit $\dot{\alpha}_k$ nach Gl.(64) aufgetragen über der Zeit t in s

9.2 Käfig-Verformungsprogramm KV

Das Programm KV wendet die in Abschnitt 6 beschriebene Methode zur Ermittlung der Einflußzahlen für die Verformung des Käfigs an. Es erzeugt nach Eingabe der Käfig - Geometriedaten die von SI benötigte Datei VRTM.

9.2.1 Programmablauf. Der Programmablauf folgt dem in *Bild 156* wiedergegebenen Schema. Zunächst baut KV abhängig von der gewünschten Knotenanzahl die Steifigkeitsmatrix und die Vektoren für die radiale und tangentielle Einheitsbelastung sowie das Einheits - Biegemoment auf. Nach der Iteration des Verschiebungsvektors mit Hilfe der cg - Methode erfolgt die Überführung der Verschiebungen in Einflußzahlen durch Koordinatentransformation. Zu diesem Zeitpunkt kann die Anzahl der Knotenpunkte für die Simulationsrechnung abweichend von dem ursprünglich gewählten Wert neu festgelegt werden. Dabei erwies es sich als günstig, zunächst die Finite - Elemente - Rechnung mit 100 bis 200 Knotenpunkten durchzuführen und dann auf die von SI verlangte Anzahl von n_w (Anzahl der Wälzkörper) Knotenpunkten herunterzugehen. Wenn die Orte der alten und neuen Knotenpunkte nicht übereinstimmen, führt KV automatisch eine Interpolation zwischen den Verschiebungen durch.

9.2.2 Dateneingabe-Datenausgabe. KV verlangt als Eingabe lediglich den Innen- und den Außendurchmesser sowie die Gesamtbreite des Käfig - Ersatzringes (s. Abschn. 6). Da nach Gleichung (143) der Elastizitätsmodul linear in die Verformungen eingeht, wird programmintern mit einem Zahlenwert $E=1 \text{ N/mm}^2$ gerechnet. Das Simulationsprogramm dividiert dann die so gewonnenen Einflußzahlen durch den gewünschten Elastizitätsmodul. Auf diese Weise läßt sich der Käfigwerkstoff ändern, ohne daß ein neuer Satz von Einflußzahlen benötigt wird.

Tafel 19 zeigt den Aufbau der Datei VRTM. Sie enthält drei Datensätze mit Einflußzahlen für die drei Einheitsbelastungen.

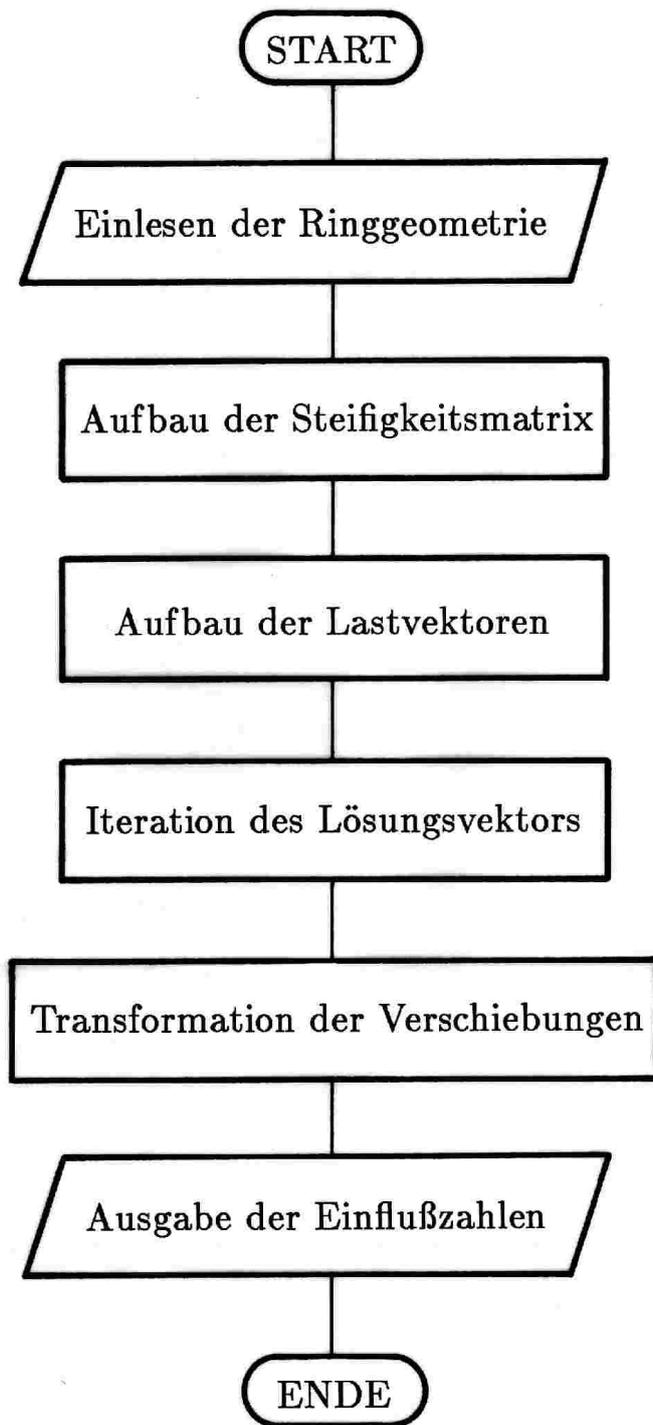


Bild 168: Programmablauf KV

Tafel 19: Struktur der Datei VRTM, Bezeichnungen s. Erläuterung zu Gleichung (171)

δ_{rr}	δ_{rt}	δ_{rm}
·	·	·
·	·	·
·	·	·
δ_{tr}	δ_{tt}	δ_{tm}
·	·	·
·	·	·
·	·	·
δ_{mr}	δ_{mt}	δ_{mm}
·	·	·
·	·	·
·	·	·

9.2.3 Beispiel. Die Berechnung der Einflußzahlen für den Käfig eines Lagers mit den Abmessungen nach *Bild 169* erfordert die Eingabe von

$$\text{RBKA} = 0.0430 \tag{273}$$

$$\text{RBKI} = 0.0355 \tag{274}$$

$$\text{BREITE} = 0.0070 \tag{275}$$

9.3 Auswertungsprogramm AW

Das Programm AW ermöglicht die graphische Auswertung der Ergebnisse der Simulationsrechnung. Die über der Zeit oder über den Lagewinkel im geführten Koordinatensystem dargestellten Verläufe der einzelnen, das Lager beschreibenden Größen vermitteln einen genaueren Einblick in das dynamische Verhalten des Lagers. Weitere Aufschlüsse ergeben Zeichnungen des Lagers zu jedem berechneten Zeitpunkt.

9.3.1 Programmablauf. Entsprechend *Bild 158* erfolgt nach dem Einlesen der von SI erstellten Datei DATEN die Anzeige des Hauptmenüs. Hier wählt man die Art der Graphikausgabe (Bildschirm, Plotter, geräteneutrale Graphikdatei) und die Darstellung (Kurvenverlauf, Lagerplot). Anschließend fordert das Programm nähere Angaben zu dem Ausschnitt und der Vergrößerung. Nach der Graphikausgabe erscheint wieder das Hauptmenü zur Fortsetzung des Dialogs.

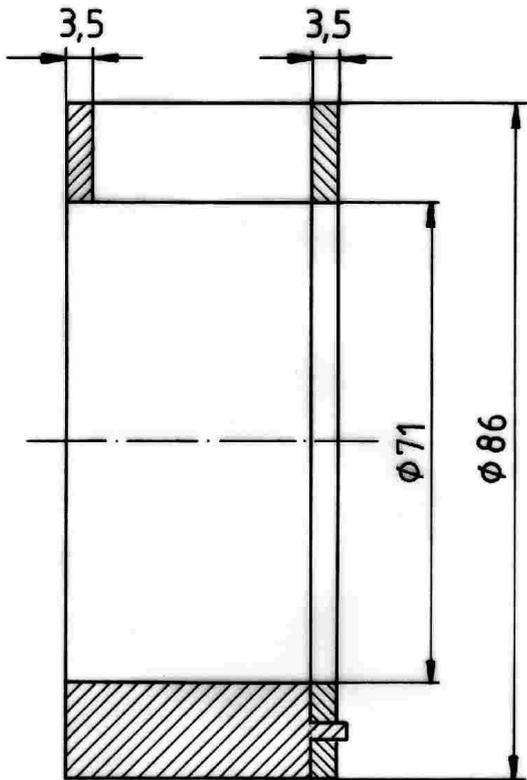


Bild 169: Käfiggeometrie

10 Vergleich von theoretischen und experimentellen Ergebnissen

Um die Anwendbarkeit des vorgestellten Rechenverfahrens auf die Praxis zu beurteilen, wurden Kontrollrechnungen mit unterschiedlichen Lagertypen und Betriebszuständen durchgeführt. Zur Absicherung der Ergebnisse des Simulationsprogramms über einen weiten Bereich dienten Rechnungen mit Zylinderrollenlagern bei extremen Betriebszuständen innerhalb des Versuchsprogramms nach Bild 63. Bei umlaufendem Innen- und Außenring wählte man jeweils die Betriebsfälle mit der kleinsten und größten Drehzahl n_{ps} und n_{s0} bei gegen- bzw. gleichsinniger Drehrichtung. Für die Variation der Baugröße kamen zwei Rechenläufe mit Nadellagern bei hoher Führungsnormalbeschleunigung hinzu.

Die *Bilder* 171 bis 174 stellen die am Prüfstand gemessenen den theoretisch ermittelten Werten gegenüber. Die Rechenergebnisse zeigen allgemein eine gute Übereinstimmung mit den Meßwerten. Die in den Versuchsergebnissen vorgefundenen Tendenzen bestätigen sich auch in den Simulationsrechnungen.

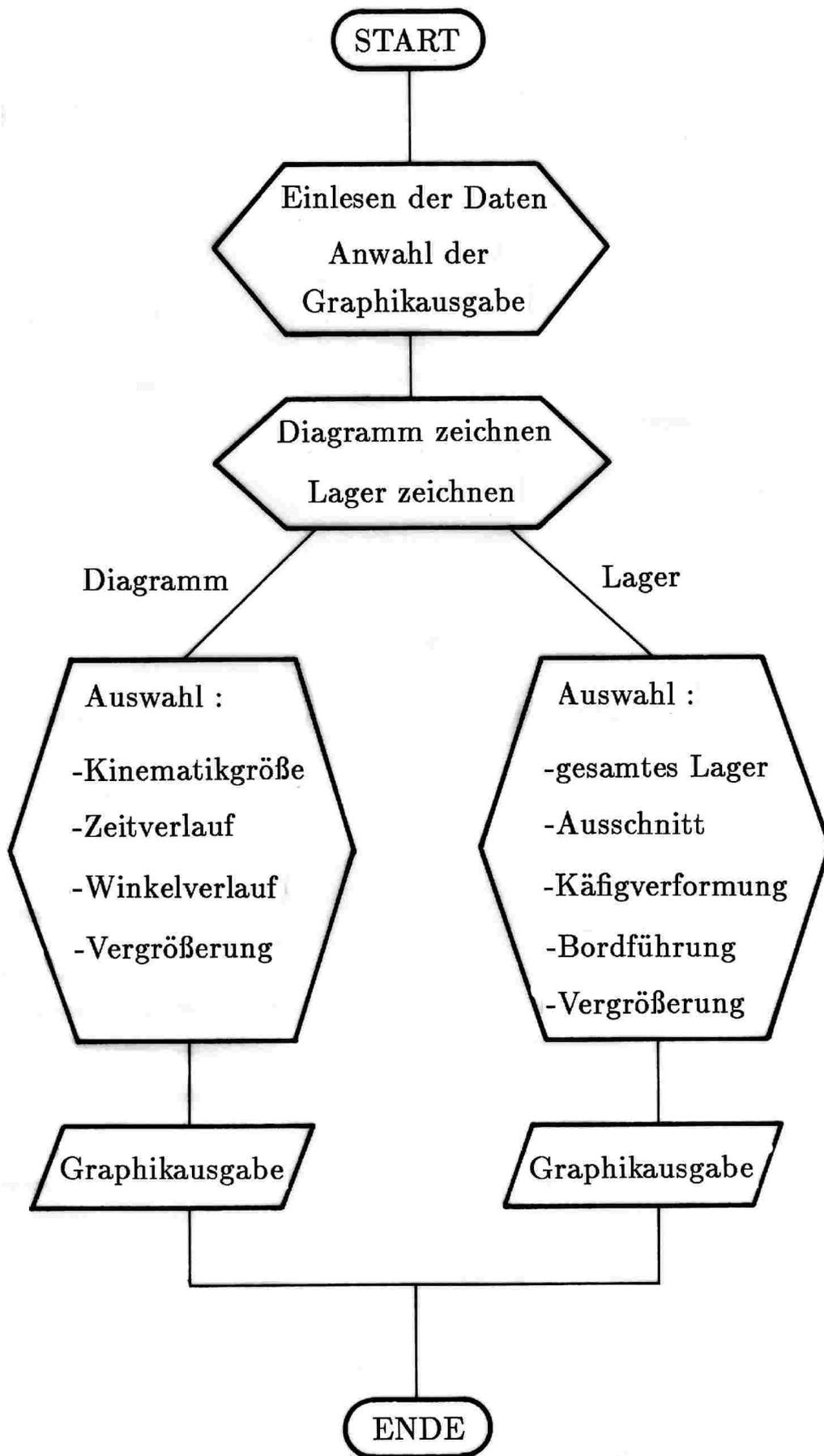


Bild 170: Programmablauf AW

Da das Simulationsprogramm - wie in Abschn. 5 erwähnt - die Schmierstoffreibung nicht erfaßt, liegen bei kleinen Führungsbeschleunigungen die berechneten Werte im allgemeinen unter den experimentell ermittelten. Dort würde die Berücksichtigung des Leerlaufreibmomentes nach Gleichung (6) eine weitere Annäherung an die Versuchsergebnisse bringen. Bei hohen Planetenradträgerdrehzahlen läßt sich dagegen keine einheitliche Tendenz diesbezüglich feststellen. Hier scheint die Schmierstoffreibung gegenüber den übrigen Einflüssen vernachlässigbar zu sein.

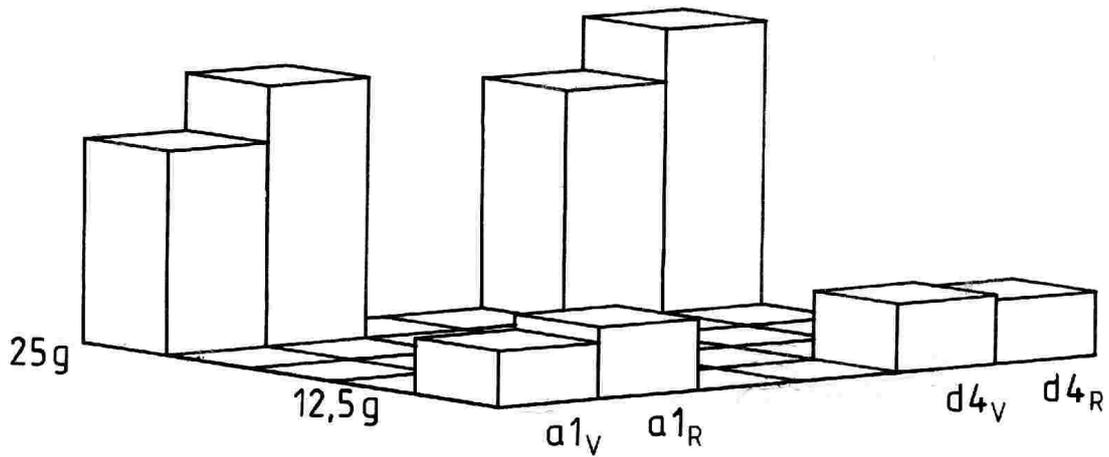


Bild 171: Experimentell und theoretisch ermittelte Reibmomente des vollrolligen Lagers SL18 2211
gemessenes Leerlaufreibmoment

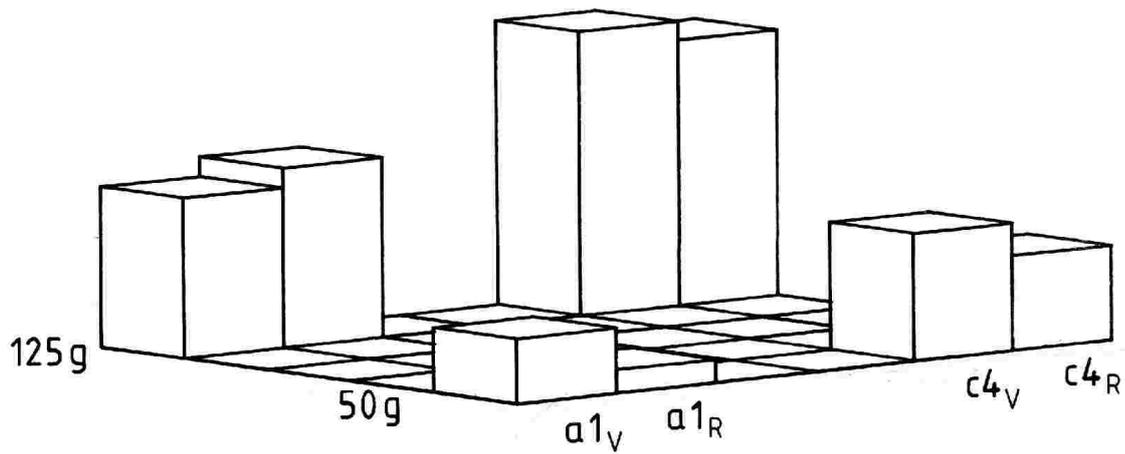


Bild 172: Experimentell und theoretisch ermittelte Reibmomente des wälzkörpergeführten Lagers 2211 ECP
gemessenes Leerlaufreibmoment

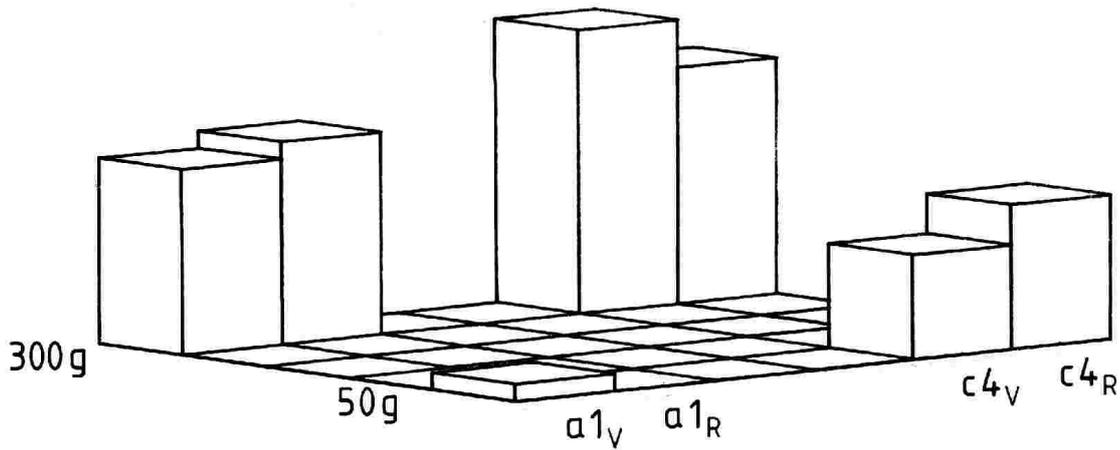


Bild 173: Experimentell und theoretisch ermittelte Reibmomente des bordgeführten Lagers 2211 ECMA
gemessenes Leerlaufreibmoment

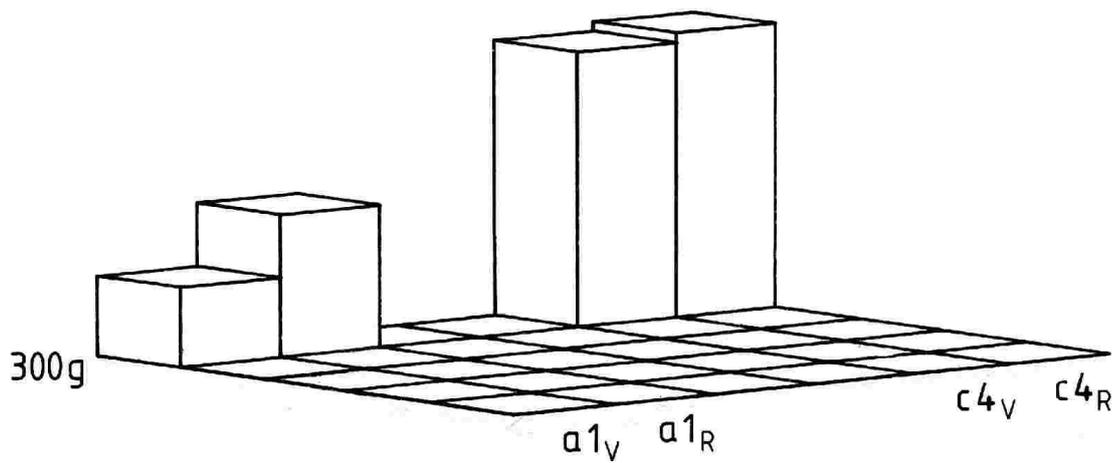


Bild 174: Experimentell und theoretisch ermittelte Reibmomente des Nadel-lagers NA4911
gemessenes Leerlaufreibmoment

11 Zusammenfassung

Das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Programmsystem ermöglicht rechnerische Vorhersagen über die Reibmomente von allgemein beschleunigten Wälzlagern mit zylindrischen Rollkörpern unter Berücksichtigung ihres dynamischen Verhaltens. Das Rechenprogramm baut auf einem Modell auf, das den dynamischen Zustand sowie die elastischen Verformungen des Käfigs erfaßt. Die für die Berechnungen notwendigen theoretischen Zusammenhänge werden vorgestellt.

Die experimentellen Untersuchungen an Nadel- und Zylinderrollenlagern verschiedener Baugrößen und Konstruktionen ergeben einen Einblick in das Reibungs- und Schlupfverhalten. Die Reibmomente steigen grundsätzlich mit wachsender Drehzahl des Planetenradträgers. Die Lage der Lastzone und die Drehrichtungen von Wälzlager und Planetenradträger stellen weitere wichtige Einflußgrößen dar. So führt bei den untersuchten Zylinderrollenlagern der Eintritt der Wälzkörper von der dem Getriebemittelpunkt abgewandten Seite des Lagers in die Lastzone zu höheren Reibmomenten als bei umgekehrter Drehrichtung. Die Nadellager weisen bei gegensinniger Drehung von Planetenrad und Planetenradträger eine Tendenz zu höheren Reibmomenten als bei gleichsinniger Rotation auf.

Simulationsrechnungen bei verschiedenen Lagerdrehzahlen, -drehrichtungen und -bauarten zeigen in einem großen Parameterbereich eine gute Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Reibmomenten.

12 Formelzeichen

Die folgende Auflistung enthält die in dieser Arbeit verwendeten Formelzeichen nach lateinischen Buchstaben, griechischen Buchstaben und Indizes geordnet.

Die Variablennamen des Simulationsprogrammes erläutern die Abschnitte 9.1.2 und 14.1.

Lateinische Buchstaben.

a_n	Führungsnormalbeschleunigung
C	Steifigkeit
d	Durchmesser
e	Exzentrizität
E	Elastizitätsmodul
\vec{e}	Einheitsvektor
F	Kraft
g	Erdbeschleunigung
h_0	minimale Schmierpalthehöhe
h_{nom}	nominelle Schmierpalthehöhe
M	Gesamttriebmoment
M_0	Leerlauftriebmoment
M_1	lastabhängiges Reibmoment
n	Drehzahl
n_w	Anzahl der Wälzkörper
N	Formfunktion
r	Radius
t	Zeit
u	Koordinate des lokalen Schmierpaltheystems, Umfangsgeschwindigkeit der Schmierpalthegrenze
v_m	Annäherungsgeschwindigkeit der Schmierpalthegrenzen
x	Koordinate des Globalsystems
y	Koordinate des lokalen Schmierpaltheystems, Koordinate des Globalsystems

Griechische Buchstaben.

α	Steifigkeit
β	Lagewinkel innerhalb des geführten Polarkoordinatensystems
δ	Einflußzahl
ϵ	Verzerrung
μ	Reibbeiwert
ν	dynamische Viskosität
ω	Winkelgeschwindigkeit
ρ	Dichte
σ	Spannung
Θ	Massenträgheitsmoment

Indizes.

*	konstante Größe innerhalb der Simulationsrechnung
0	Gehäuse, ortsfest
<i>a</i>	Außenring
<i>b</i>	Käfigbord
<i>cor</i>	Coriolisbeschleunigung
<i>i</i>	Innenring
<i>j</i>	Zählvariable
<i>k</i>	Käfig
<i>kl</i>	Zählvariable für Knotenpunkte des Käfig-Ersatzringes
<i>kn</i>	Knoten
<i>m</i>	Moment
<i>r</i>	Radial
<i>s</i>	Käfigsteg
<i>t</i>	tangential
<i>w</i>	Wälzkörper

13 Literatur

Im Text genannte Quellen :

- [1] FAG Kugelfischer Georg Schäfer KGaA (Hrsg.):
Wälzlager auf den Wegen des technischen Fortschritts.
München : Oldenbourg, 1984,
S. 67-68
- [2] Potthoff, Heinrich: Anwendungsgrenzen vollrolliger
Planetenrad-Wälzlager.
Bochum : Schriftenreihe des Instituts für Konstruktionstechnik
der Ruhr-Universität, 1986.
- [3] Hoch, Paul G.: Tragfähigkeit von Käfigen in Rollenlagern
für Planetenräder.
Bochum : Schriftenreihe des Instituts für Konstruktionstechnik
der Ruhr-Universität, 1983.
- [4] Eschmann, Paul: Wälzlagerpraxis.
München : Oldenbourg, 1978,
S. 194-203
- [5] Wenzel, H?: Gewöhnliche Differentialgleichungen.
Leipzig : Teubner, 1974,
S. 40-50
- [6] Zienkiewicz, O? C.: Methode der finiten Elemente.
München : Hanser, 1984.
- [7] Lehmann, Theodor: Elemente der Mechanik II: Elastostatik.
Braunschweig : Vieweg, 1975,
S. 298-322
- [8] Hestenes, Magnus: Conjugate Direction Methods in Optimisation.
New York : Springer, 1980.
- [9] Gupta, Pradeep: Advances Dynamics of Rolling Elements.
Berlin : Springer, 1984.
- [10] Norm DIN 50281: 10.77 Reibung in Lagerungen.
- [11] Eschmann, Paul: Untersuchungen über den Einfluß des
Verschleißes auf die Lebensdauer der Wälzlager.
Braunschweig : Univ., Diss., 1963,
S. 27-41
- [12] Jarchow, Friedrich: Getriebetechnik.
Bochum : Univ., 1978, Vorlesungskurzfassung,
S. 103-107

- [13] Lorösch, Heinz?K.: Prüfung von Getriebelagerungen.
Schweinfurt : FAG Kugelfischer, Publ.Nr WL 04202 DA, 1987
S. 17-25
- [14] Jarchow, Friedrich / Siepmann, Thomas: Reibmomente in
Planetenrad-Wälzlagern.
Frankfurt : Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V.,
Forschungsreport 1983

Zusätzlich verwendete Literatur :

- [15] Braun, H?: Gesichtspunkte zur Optimierung der Käfig-
konstruktionen in den Rollenachslagern von Güter- und
Reisezugwagen.
Schriftenreihe Wälz- und Gleitlagertechnik, 1969
S. 17-27
- [16] Düser, Ewald: Tragfähigkeit von Blech- und Massivkäfigen in
Zylinderrollenlagern für Planetenräder.
Bochum : Schriftenreihe des Instituts für Konstruktionstechnik
der Ruhr-Universität, 1982.
- [17] Fox, R? W. / Mc Donald, A? T.: Introduction to Fluid Mechanics.
New York : Wiley Sons, 1978
- [18] FVA (Hrsg.): Programmierrichtlinie für FVA-FORTRAN77-
Programme.
Frankfurt : Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V.,1985
Merkblatt Nr. 0/11
- [19] FVA (Hrsg.): Referenzöle für Wälz- und Gleitlager, Zahnrad-
und Kupplungsversuche.
Frankfurt : Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 1976
Heft 41
- [20] Hampp, W?: Wälzlagerungen, Berechnung und Gestaltung.
Berlin : Springer, 1948
- [21] Kleinlein, E?: Einfluß von Schmierung und Kontaktflächengeo-
metrie auf das Reibungsverhalten von Axial-Rillenkugellagern
und Radial-Zylinderrollenlagern.
Konstruktion 22, 1970, Heft 2, S. 41-47
- [22] Kramer, K.: Einfluß axialer Verschiebung auf radial belastete
Wälzlager.
Hannover, Univ., Diss., 1934
- [23] Lorösch, H?-K. / Kraus, A?.: Neue Bestimmungsgrößen
für die erweiterte Lebensdauerberechnung von Wälzlagern mit
Beispielen aus dem Getriebebau.
Antriebstechnik 24, 1985, Nr.4, S. 69-74

- [24] Mangoldt, H. v. / Knopp, Konrad: Einführung in die höhere Mathematik.
Stuttgart : Hirzel, 1974
- [25] Niemann, Gustav: Maschinenelemente.
Berlin : Springer, 1981
- [26] Njoya, Georges: Untersuchungen zu Kinematik im Wälzlager bei synchron umlaufenden Innen- und Außenringen.
Hannover : Univ., Diss., 1980
- [27] Pittroff, H? / Schröder, H?: Kunststoffe in der Wälzlagertechnik.
Maschinenmarkt Hefte 83 und 87, 1971
- [28] Pollmann, E? / Vermeulen, M?: Optimierung hydrostatischer Radiallager.
Konstruktion 36, 1984, Heft 4, S. 121-127
- [29] Rechenzentrum der Universität Bochum (Hrsg.): Zur Spezifikation und Struktur größerer Systeme.
Bochum : Rechenzentrums-Schriften der Ruhr-Universität Bd.4, 1984
- [30] Waldmann, H? / Seidel, G? H.: Kraft- und Schmierstoffe.
Berlin : Walter de Gruyter, 1979,
S. 954-1252

14 Anhang

14.1 Einflußzahlen für Käfigverformung

14.1.1 Käfig 2211 ECP. Dieser Abschnitt enthält die Datei VRTM mit Einflußzahlen für die Verformungen eines Käfigs des Lagers 2211 ECP. Der Rechnung liegen folgende Daten zugrunde (s. auch Abschn. 9.2) :

17 Knoten

RBKA = 0.04235 , RBKI = 0.03810 , BREITE = 0.00600

```
.63352896031806E-001-.28509515780767E-025 .49669801552995E-025
.48773733716455E-001 .21453848745110E-001-.11906182423084E+001
.18650605679699E-001 .34015955573213E-001-.12883952612011E+001
-.10000659946240E-001 .35276697453513E-001-.72734965824886E+000
-.26919250901803E-001 .27927407364228E-001 .51004846631005E-001
-.29436741481971E-001 .17034981347984E-001 .68407448573495E+000
-.21187923523065E-001 .74137749680277E-002 .94931964622028E+000
-.93217647226841E-002 .17776258176565E-002 .79020888922721E+000
-.11374234737385E-002 .61304917711818E-004 .30404143964021E+000
-.11374234737385E-002-.61304917711818E-004-.30404143964021E+000
-.93217647226841E-002-.17776258176565E-002-.79020888922721E+000
-.21187923523065E-001-.74137749680277E-002-.94931964622028E+000
-.29436741481971E-001-.17034981347984E-001-.68407448573495E+000
-.26919250901803E-001-.27927407364228E-001-.51004846631005E-001
-.10000659946240E-001-.35276697453513E-001 .72734965824886E+000
.18650605679699E-001-.34015955573213E-001 .12883952612011E+001
.48773733716455E-001-.21453848745110E-001 .11906182423084E+001

.59957850358163E-025 .71826997583502E-001 .00000000000000E+000
-.24550710796374E-001 .66975774340925E-001 .25863254659572E+000
-.39791431295413E-001 .54609278596917E-001 .74249525930787E+000
-.42950776847350E-001 .38884064231550E-001 .11263045314095E+001
-.36463663484023E-001 .23936052884979E-001 .12495559938135E+001
-.25280545503730E-001 .12444630682681E-001 .11027308633058E+001
-.14255038030243E-001 .52019447947655E-002 .78582981496487E+000
-.62906373010417E-002 .15250894931528E-002 .45060846196864E+000
-.16365576139759E-002 .14752020665486E-003 .24029326762683E+000
.16365576139759E-002 .14752020665486E-003 .24029326762683E+000
.62906373010417E-002 .15250894931528E-002 .45060846196864E+000
.14255038030243E-001 .52019447947655E-002 .78582981496487E+000
.25280545503730E-001 .12444630682681E-001 .11027308633058E+001
.36463663484023E-001 .23936052884979E-001 .12495559938135E+001
.42950776847350E-001 .38884064231550E-001 .11263045314095E+001
.39791431295413E-001 .54609278596917E-001 .74249525930787E+000
.24550710796374E-001 .66975774340925E-001 .25863254659572E+000

.11897737603101E+001 .00000000000000E+000 .24027842366929E+003
.38989733188934E+001 .12653092927642E+001 .16039988221796E+003
.51201308255021E+001 .30231285664952E+001 .11289647070657E+003
.51845557543045E+001 .48900140530153E+001 .93414596298727E+002
.44646417024678E+001 .65953221873129E+001 .95354658268978E+002
.33059969562055E+001 .79769354810963E+001 .11076236065048E+003
.19791274701639E+001 .89587391952562E+001 .13140298398158E+003
.65741932801844E+000 .95188896344755E+001 .14987352979926E+003
-.57756616272016E+000 .96588334820568E+001 .16060253660301E+003
-.17080775675067E+001 .93818448249536E+001 .16060253660301E+003
-.27384934271801E+001 .86868508689049E+001 .14987352979926E+003
-.36515593544014E+001 .75791543670965E+001 .13140298398158E+003
-.43742831047783E+001 .60951760833041E+001 .11076236065048E+003
-.47630144619413E+001 .43344373538049E+001 .95354658268978E+002
-.46130714034426E+001 .24894795889382E+001 .93414596298727E+002
-.36929325932197E+001 .86382385627158E+000 .11289647070657E+003
-.17974938294027E+001-.13039249224961E+000 .16039988221796E+003
```

14.1.2 Käfig 2211 ECMA. Dieser Abschnitt enthält die Datei VRTM mit Einflußzahlen für die Verformungen eines Käfigs des Lagers 2211 ECMA. Der Rechnung liegen folgende Daten zugrunde (s. auch Abschn. 9.2) :

17 Knoten

RBKA = 0.042965 , RBKI = 0.039750 , BREITE = 0.006800

```
.11975183450763E-001 .51826857682406E-025 .00000000000000E+000
.92360847736798E-002 .40416120134042E-002-.22773691773094E+000
.35743181265627E-002 .64005499115086E-002-.24674331820501E+000
-.18154542024343E-002 .66300723264673E-002-.13984970785003E+000
-.50057859118829E-002 .52408876867832E-002 .86690044638644E-002
-.54938330163883E-002 .31885537287616E-002 .12959012601236E+000
-.39596753483343E-002 .13794567702148E-002 .18041478658309E+000
-.17431498103834E-002 .32365187187247E-003 .15032452425122E+000
-.21274885500974E-003 .76661524775135E-005 .57859201174899E-001
-.21274885500974E-003-.76661524775135E-005-.57859201174899E-001
-.17431498103834E-002-.32365187187247E-003-.15032452425122E+000
-.39596753483343E-002-.13794567702148E-002-.18041478658309E+000
-.54938330163883E-002-.31885537287616E-002-.12959012601236E+000
-.50057859118829E-002-.52408876867832E-002-.86690044638644E-002
-.18154542024343E-002-.66300723264673E-002 .13984970785003E+000
.35743181265627E-002-.64005499115086E-002 .24674331820501E+000
.92360847736798E-002-.40416120134042E-002 .22773691773094E+000

.39444088709357E-025 .13478084870838E-001 .00000000000000E+000
-.45988478957646E-002 .12521907051332E-001 .49313304902620E-001
-.74397638825662E-002 .10169066336674E-001 .14149894297560E+000
-.80109127809472E-002 .72050743503015E-002 .21447208416875E+000
-.67768644698068E-002 .44059234925431E-002 .23762698995361E+000
-.46722246646405E-002 .22695271833343E-002 .20919736477547E+000
-.26104438777540E-002 .93663864242083E-003 .14833146686798E+000
-.11357035210638E-002 .27040231688055E-003 .84054796055582E-001
-.29111026836414E-003 .25837899703408E-004 .43752394672936E-001
.29111026836414E-003 .25837899703408E-004 .43752394672936E-001
.11357035210638E-002 .27040231688055E-003 .84054796055582E-001
.26104438777540E-002 .93663864242083E-003 .14833146686798E+000
.46722246646405E-002 .22695271833343E-002 .20919736477547E+000
.67768644698068E-002 .44059234925431E-002 .23762698995361E+000
.80109127809472E-002 .72050743503015E-002 .21447208416875E+000
.74397638825662E-002 .10169066336674E-001 .14149894297560E+000
.45988478957646E-002 .12521907051332E-001 .49313304902620E-001

.45044601194728E-001 .00000000000000E+000 .47752531195723E+002
.60058231102518E+000 .13838231009605E+000 .32204280503257E+002
.89500003760224E+000 .42369954377827E+000 .22949456347960E+002
.97620453677801E+000 .77191635273416E+000 .19142261120321E+002
.90397777435387E+000 .11186111598795E+001 .19500552294139E+002
.73711783635240E+000 .14206670950779E+001 .22479002879290E+002
.52356730468255E+000 .16538301634088E+001 .26477806394692E+002
.29512403967388E+000 .18075806634736E+001 .30058739598411E+002
.67288236584016E-001 .18791455353399E+001 .32139402505952E+002
-.15629287513550E+000 .18684608486474E+001 .32139402505952E+002
-.37626597589369E+000 .17754956992758E+001 .30058739598411E+002
-.58900655358059E+000 .16006615258330E+001 .26477806394692E+002
-.77934948837790E+000 .13481968487340E+001 .22479002879290E+002
-.91664498546291E+000 .10316056716956E+001 .19500552294139E+002
-.95548180366562E+000 .67960326252239E+000 .19142261120321E+002
-.84144148023670E+000 .34071697888497E+000 .22949456347960E+002
-.52115757284906E+000 .84775638595524E-001 .32204280503257E+002
```

14.1.3 Käfig 2309 MPA. Dieser Abschnitt enthält die Datei VRTM mit Einflußzahlen für die Verformungen eines Käfigs des Lagers 2309 MPA. Der Rechnung liegen folgende Daten zugrunde (s. auch Abschn. 9.2) :

12 Knoten

RBKA = 0.039750 , RBKI = 0.033750 , BREITE = 0.006800

```
.15251907667090E-001-.37123417472718E-026 .00000000000000E+000
.89384790714775E-002 .67329076790392E-002-.35144061676083E+000
-.13402433400755E-002 .85777316021495E-002-.22275248669771E+000
-.68652206953615E-002 .60610880302049E-002 .60197787801403E-001
-.58998556795791E-002 .24445377732797E-002 .23686342254482E+000
-.20084667890890E-002 .35106279173669E-003 .19833009134157E+000
-.47331655261114E-026-.18554059360392E-026-.12558617556873E-023
-.20084667890890E-002-.35106279173669E-003-.19833009134157E+000
-.58998556795791E-002-.24445377732797E-002-.23686342254482E+000
-.68652206953615E-002-.60610880302049E-002-.60197787801403E-001
-.13402433400755E-002-.85777316021495E-002 .22275248669771E+000
.89384790714775E-002-.67329076790392E-002 .35144061676083E+000

-.45753441184119E-025 .17193599992991E-001 .00000000000000E+000
-.77263298537018E-002 .14905926775681E-001 .11897591764086E+000
-.10298389203187E-001 .98573803787619E-002 .28159377773053E+000
-.80479322566376E-002 .48695614453626E-002 .32228081140894E+000
-.41651953743173E-002 .16676918326266E-002 .23420793730789E+000
-.13444849663993E-002 .30683114551115E-003 .10954284004508E+000
-.47334706293036E-026-.18554008702661E-026 .53176989616020E-001
.13444849663993E-002 .30683114551115E-003 .10954284004508E+000
.41651953743173E-002 .16676918326266E-002 .23420793730789E+000
.80479322566376E-002 .48695614453626E-002 .32228081140894E+000
.10298389203187E-001 .98573803787619E-002 .28159377773053E+000
.77263298537018E-002 .14905926775681E-001 .11897591764086E+000

.90740853116402E-001 .00000000000000E+000 .70200698046567E+002
.10522561270785E+001 .35683969423494E+000 .40564606916722E+002
.13420426644476E+001 .10045745600074E+001 .28541205498908E+002
.11816768928709E+001 .16683842355752E+001 .29454720862681E+002
.79811850808687E+000 .21874220107096E+001 .36917930583844E+002
.35075727130753E+000 .24953311138317E+001 .44543612238202E+002
-.90517353202078E-001 .25777571780759E+001 .47655992895309E+002
-.51591504261613E+000 .24343899707233E+001 .44543612238202E+002
-.91578522596575E+000 .20669067351518E+001 .36917930583844E+002
-.12229349163100E+001 .14993009615061E+001 .29454720862681E+002
-.12888287675136E+001 .81958155877844E+000 .28541205498908E+002
-.91124936961516E+000 .21877335988268E+000 .40564606916722E+002
```

14.1.4 Käfig NA4911. Dieser Abschnitt enthält die Datei VRTM mit Einflußzahlen für die Verformungen eines Käfigs des Lagers NA4911. Der Rechnung liegen folgende Daten zugrunde (s. auch Abschn. 9.2) :

26 Knoten

RBKA = 0.035682 , RBKI = 0.032064 , BREITE = 0.003600

```
.10221545948093E+000-.39931846580711E-024 .10265460668019E-025
.91311816874466E-001 .23738438685584E-001-.17664267692654E+001
.64962692345202E-001 .42762173494042E-001-.25252313993587E+001
.32067529101673E-001 .54444755369260E-001-.24900571008247E+001
.42038162863422E-004 .58145743147871E-001-.19006236989656E+001
-.25732758575284E-001 .54778532021248E-001-.10002216787268E+001
-.42165269014163E-001 .46281423162950E-001-.14669507382615E-001
-.48414341955989E-001 .35062697592012E-001 .86564717640871E+000
-.45590659690756E-001 .23487767877448E-001 .14993330369187E+001
-.36255251018111E-001 .13464458363808E-001 .18022012277776E+001
-.23790312777171E-001 .61668317658435E-002 .17496705128863E+001
-.11726613058115E-001 .19180692630340E-002 .13733620538664E+001
-.31123787272850E-002 .23297530508124E-003 .75234876990282E+000
-.47331654313260E-026-.17101494683233E-026-.42855469276621E-023
-.31123787272850E-002-.23297530508124E-003-.75234876990282E+000
-.11726613058115E-001-.19180692630340E-002-.13733620538664E+001
-.23790312777171E-001-.61668317658435E-002-.17496705128863E+001
-.36255251018111E-001-.13464458363808E-001-.18022012277776E+001
-.45590659690756E-001-.23487767877448E-001-.14993330369187E+001
-.48414341955989E-001-.35062697592012E-001-.86564717640871E+000
-.42165269014163E-001-.46281423162950E-001 .14669507382615E-001
-.25732758575284E-001-.54778532021248E-001 .10002216787268E+001
.42038162863422E-004-.58145743147871E-001 .19006236989656E+001
.32067529101673E-001-.54444755369260E-001 .24900571008247E+001
.64962692345202E-001-.42762173494042E-001 .25252313993587E+001
.91311816874466E-001-.23738438685584E-001 .17664267692654E+001

-.24769306683362E-024 .11588951287824E+000 .00000000000000E+000
-.27047994304179E-001 .11241349670106E+000 .23457218607497E+000
-.49188945781063E-001 .10293094702388E+000 .76986071954092E+000
-.63615242957144E-001 .89015451662256E-001 .13874710411069E+001
-.69526991421256E-001 .72667411326080E-001 .19242831413198E+001
-.67709103484882E-001 .55877151543694E-001 .22760035084999E+001
-.60009840504217E-001 .40303834663553E-001 .23954437664499E+001
-.48791114933278E-001 .27085416471583E-001 .22860367435245E+001
-.36418339341081E-001 .16777978099065E-001 .19915315977965E+001
-.24845706637193E-001 .94079069297753E-002 .15830383119752E+001
-.15337319353728E-001 .46085520582805E-002 .11447859607922E+001
-.83448415500543E-002 .18055157163463E-002 .76000798516505E+000
-.35425309236763E-002 .41226658772567E-003 .49831407214706E+000
-.31554436208840E-026-.17101494683233E-026 .40572493776211E+000
.35425309236763E-002 .41226658772567E-003 .49831407214706E+000
.83448415500543E-002 .18055157163463E-002 .76000798516505E+000
.15337319353728E-001 .46085520582805E-002 .11447859607922E+001
.24845706637193E-001 .94079069297753E-002 .15830383119752E+001
.36418339341081E-001 .16777978099065E-001 .19915315977965E+001
.48791114933278E-001 .27085416471583E-001 .22860367435245E+001
.60009840504217E-001 .40303834663553E-001 .23954437664499E+001
.67709103484882E-001 .55877151543694E-001 .22760035084999E+001
.69526991421256E-001 .72667411326080E-001 .19242831413198E+001
.63615242957144E-001 .89015451662256E-001 .13874710411069E+001
.49188945781063E-001 .10293094702388E+000 .76986071954092E+000
.27047994304179E-001 .11241349670106E+000 .23457218607497E+000

.49068995105685E+001 .00000000000000E+000 .50851606993272E+003
.81359211877497E+001 .23757670311407E+001 .38104481465966E+003
.99723877633365E+001 .49163592779845E+001 .28604141005589E+003
.10625884148552E+002 .74360303705262E+001 .22162276942135E+003
.1032797979596766E+002 .97929366480006E+001 .18477203454890E+003
.93141600832520E+001 .11888031931752E+002 .17151417503990E+003
.78079073257628E+001 .13660662851236E+002 .17714682582276E+003
.60079741012005E+001 .15081680416099E+002 .19651367063264E+003
.40795781140683E+001 .16145093361345E+002 .22430406030299E+003
.21498689644439E+001 .16859321199406E+002 .25536167856897E+003
.30763943861499E+000 .17239088121942E+002 .28498416035899E+003
```

-.13931240172636E+001 .17298870336798E+002 .30919647527440E+003
-.29265485732219E+001 .17048609817036E+002 .32498176510808E+003
-.42860195415460E+001 .16492141048119E+002 .33045694315996E+003
-.54742603013568E+001 .15628484460569E+002 .32498176510808E+003
-.64935362313221E+001 .14455838829885E+002 .30919647527440E+003
-.73371072908292E+001 .12977813757829E+002 .28498416035899E+003
-.79829109954968E+001 .11211186995797E+002 .25536167856897E+003
-.83902435208922E+001 .91942638389662E+001 .22430406030299E+003
-.84998857236880E+001 .69948237368791E+001 .19651367063264E+003
-.82378093479779E+001 .47165861492187E+001 .17714682582276E+003
-.75222235052788E+001 .25032279206706E+001 .17151417503990E+003
-.62733982876940E+001 .53912766103407E+000 .18477203454890E+003
-.44253951027260E+001-.95373487487513E+000 .22162276942135E+003
-.19386174490409E+001-.17229792061589E+001-.60772209060454E+004
.11880699587379E+001-.14970493453432E+001-.59021404925199E+004

14.1.5 Käfig NKI55/25. Dieser Abschnitt enthält die Datei VRTM mit Einflußzahlen für die Verformungen eines Käfigs des Lagers NKI55/25. Der Rechnung liegen folgende Daten zugrunde (s. auch Abschn. 9.2) :

36 Knoten

RBKA = 0.032275 , RBKI = 0.030300 , BREITE = 0.004000

```
.44422303325356E+000-.99803917525720E-024 .10516219165433E-026
.41843056261057E+000 .75918118603035E-001-.65343486166700E+001
.35160939015647E+000 .14351274029818E+000-.10455201117175E+002
.25909766605884E+000 .19697822253268E+000-.12113783438473E+002
.15495587145594E+000 .23308509534016E+000-.11910955213302E+002
.51326223857494E-001 .25089861854067E+000-.10276205563121E+002
-.42034731641623E-001 .25140040385955E+000-.76466275927502E+001
-.11803844778526E+000 .23704452276352E+000-.44467527735096E+001
-.17235999754432E+000 .21128069819466E+000-.10700671270066E+001
-.20335529105338E+000 .17807658621849E+000 .21370594825019E+001
-.21181727958687E+000 .14146889573114E+000 .48884176197041E+001
-.20059639918800E+000 .10516935119652E+000 .69675032013115E+001
-.17411678617139E+000 .72246521709677E-001 .82332472688578E+001
-.13782423105251E+000 .44898619772483E-001 .86217822990772E+001
-.97604253267834E-001 .24325853634469E-001 .81442679522956E+001
-.59209001047196E-001 .10704158260857E-001 .68809673495173E+001
-.27729933727749E-001 .32554967148933E-002 .49719235540613E+001
-.71495501318950E-002 .40376784029855E-003 .26047287382053E+001
-.47331654313260E-026 .15796150766145E-026 .96296856567566E-023
-.71495501318950E-002-.40376784029855E-003-.26047287382053E+001
-.27729933727749E-001-.32554967148933E-002-.49719235540613E+001
-.59209001047196E-001-.10704158260857E-001-.68809673495173E+001
-.97604253267834E-001-.24325853634469E-001-.81442679522956E+001
-.13782423105251E+000-.44898619772483E-001-.86217822990772E+001
-.17411678617139E+000-.72246521709677E-001-.82332472688578E+001
-.20059639918800E+000-.10516935119652E+000-.69675032013115E+001
-.21181727958687E+000-.14146889573114E+000-.48884176197041E+001
-.20335529105338E+000-.17807658621849E+000-.21370594825019E+001
-.17235999754432E+000-.21128069819466E+000 .10700671270066E+001
-.11803844778526E+000-.23704452276352E+000 .44467527735096E+001
-.42034731641623E-001-.25140040385955E+000 .76466275927502E+001
.51326223857494E-001-.25089861854067E+000 .10276205563121E+002
.15495587145594E+000-.23308509534016E+000 .11910955213302E+002
.25909766605884E+000-.19697822253268E+000 .12113783438473E+002
.35160939015647E+000-.14351274029818E+000 .10455201117175E+002
.41843056261057E+000-.75918118603035E-001 .65343486166700E+001

-.10489398501972E-024 .50501687481229E+000 .00000000000000E+000
-.86541449831862E-001 .49722944082755E+000 .60777456934123E+000
-.16443661821211E+000 .47499758541299E+000 .21231162980875E+001
-.22756688568929E+000 .44040538761443E+000 .41196771551640E+001
-.27240912268805E+000 .39637457903331E+000 .62370512553636E+001
-.29776316940779E+000 .34623367396533E+000 .81876107758096E+001
-.30438152258241E+000 .29334366134814E+000 .97566607395267E+001
-.29453240485946E+000 .24079463539480E+000 .10816986496146E+002
-.27152860345648E+000 .19118216789467E+000 .11295016839385E+002
-.23925391253171E+000 .14646659479261E+000 .11193961680522E+002
-.20171680099296E+000 .10791300278149E+000 .10569400907756E+002
-.16265723329247E+000 .76104833522457E-001 .95208961431670E+001
-.12522764043254E+000 .51019911797308E-001 .81792661369392E+001
-.91763170639604E-001 .32154539764441E-001 .66932071432503E+001
-.63649880982359E-001 .18679217185568E-001 .52159505698726E+001
-.41292821417469E-001 .96086206852617E-002 .38926314236456E+001
-.24179374628823E-001 .39687141958255E-002 .28489936926871E+001
-.11027099069125E-001 .94521557855596E-003 .21819850366634E+001
-.31554436208840E-026-.15796150766145E-026 .19526962472224E+001
.11027099069125E-001 .94521557855596E-003 .21819850366634E+001
.24179374628823E-001 .39687141958255E-002 .28489936926871E+001
.41292821417469E-001 .96086206852617E-002 .38926314236456E+001
.63649880982359E-001 .18679217185568E-001 .52159505698726E+001
.91763170639604E-001 .32154539764441E-001 .66932071432503E+001
.12522764043254E+000 .51019911797308E-001 .81792661369392E+001
.16265723329247E+000 .76104833522457E-001 .95208961431670E+001
.20171680099296E+000 .10791300278149E+000 .10569400907756E+002
.23925391253171E+000 .14646659479261E+000 .11193961680522E+002
```

.27152860345648E+000 .19118216789467E+000 .11295016839385E+002
.29453240485946E+000 .24079463539480E+000 .10816986496146E+002
.30438152258241E+000 .29334366134814E+000 .97596607395267E+001
.29776316940779E+000 .34623367396533E+000 .81876107758096E+001
.27240912268805E+000 .39637457903331E+000 .62370512553636E+001
.22756688568929E+000 .44040538761443E+000 .41196771551640E+001
.16443661821211E+000 .47499758541299E+000 .21231162980875E+001
.86541449831862E-001 .49722944082755E+000 .60777456934123E+000

.63101289584684E+002 .00000000000000E+000 .12329300622684E+004
.66576362403901E+002 .13720506361748E+002 .74555798917347E+003
.67023240871011E+002 .25491278208147E+002 .34571951716221E+003
.64943063201442E+002 .35272371923531E+002 .30757554842662E+002
.60831409358796E+002 .43092979939106E+002-.20366658679057E+003
.55164200277273E+002 .49040854371444E+002-.36344136548634E+003
.48385862412656E+002 .53250264768401E+002-.45582608992792E+003
.40900037471596E+002 .55889140743781E+002-.48923034931211E+003
.33062991577272E+002 .57146056869818E+002-.47295849223692E+003
.25179751740678E+002 .57217695706849E+002-.41692691877764E+003
.17502875509176E+002 .56297376733819E+002-.33136277568851E+003
.10233646953228E+002 .54565166684148E+002-.22649320972375E+003
.35253931468991E+001 .52179993795892E+002-.11223462095866E+003
-.25114662260369E+001 .49274078944505E+002 .21086420087575E+001
-.78030845540478E+001 .45949875347288E+002 .10812698998171E+003
-.12305056139347E+002 .42279580741967E+002 .19856111427690E+003
-.15994987789480E+002 .38307157097220E+002 .26752255714549E+003
-.18865266571969E+002 .34052668465166E+002 .31067262958208E+003
-.20916483902037E+002 .29518632782461E+002 .32535424019468E+003
-.22151922603335E+002 .24697983103990E+002 .31067262958208E+003
-.22573441411411E+002 .19583152148433E+002 .26752255714549E+003
-.22179003983714E+002 .14175734621403E+002 .19856111427690E+003
-.20962000859686E+002 .84961471327909E+001 .10812698998171E+003
-.18912407454713E+002 .25926972126692E+001 .21086420087575E+001
-.16019713819805E+002-.34505085381455E+001-.11223462095866E+003
-.12277457383327E+002-.95073423315260E+001-.22649320972375E+003
-.76890929276296E+001-.15405574869878E+002-.66145480828681E+004
-.22748490544065E+001-.20925301218819E+002-.67001122259572E+004
.39208487112147E+001-.25800127537910E+002-.67561437994165E+004
.10821857947753E+002-.29721249573101E+002-.67724156564917E+004
.18313200491202E+002-.32344421004469E+002-.67390113971075E+004
.26234847616685E+002-.33299673283309E+002-.66466266726659E+004
.34376893066029E+002-.32203514108109E+002-.64868518939701E+004
.42476554992774E+002-.28673204811819E+002-.62524277523369E+004
.50217382802534E+002-.22342603084832E+002-.59374657900174E+004
.57230959693003E+002-.12878961638442E+002-.55376273180061E+004

14.2 Listing des Lagersimulationsprogramm SI

Das Lagersimulationsprogramm ist in FORTRAN 5 nach DIN 66027 bzw. ANSI X3.9-1978 formuliert. Lediglich das Unterprogramm DATUMZ enthält rechnerspezifische Routinen zum Einlesen von Datum und Uhrzeit.

```
PROGRAM SI
-----
C
C SI      BERECHNET DIE EIGENDYNAMIK UND DIE VERLUSTLEISTUNG VON
C ==      PLANETENRAD-WAELZLAGERN MIT ZYLINDRISCHEN ROLLKOERPERN
C
C E: RGES      ANZAHL DER ZU RECHNENDEN ZEITSCHRITTE ODER
C           ZU RECHNENDE ECHTZEIT
C           DT      SCHRITTWEITE
C           III     ANZAHL DER ZU SPEICHERNDEN DATENSAETZE
C           IAUS    FLAG FUER EINGABE-ECHO
C           ZEIT    MAXIMALE RECHENZEIT
C           TITEL   ARBEITSTITEL
C           ----- EINGABE DER GEOMETRIE- UND BETRIEBSDATEN UEBER
C                   UP: LAGER
C
C A: ----- AUSGABE DER ERGEBNISSE UEBER DIE UP: AUSG, DATEI
C VERWENDETE COMMON - BLOECKE :
C
C COMMON /KANAL/      : NUMMERN DER EIN/AUSGABEKANAELE
C COMMON /FILENAM/    : NAMEN DER EIN/AUSGABEKANAELE
C COMMON /GRENZ/      : FEHLERGRENZEN FUER AUTOMATISCHE
C                   SCHRITTWEITENSTEUERUNG
C COMMON /KVER/       : KRAEFTE UND EINFLUSSZAHLEN FUER KAEFIG-
C                   VERFORMUNG
C COMMON /FLAGS/      : FLAGS FUER KAEFIGBAUART UND -VERFORMUNG
C COMMON /KIN/        : KINEMATIKGROESSEN VON WAELZKOERPERN UND
C                   : KAEFIG, KAEFIGVERFORMUNGEN
C COMMON /RESU/       : AEUSSERE KRAEFTE AUF WAELZKOERPER UND KAEFIG
C COMMON /GEO/        : LAGER - GEOMETRIEGROESSEN
C COMMON /MUE/        : REIBZAHL BEI TROCKENER REIBUNG
C COMMON /EMOD/       : ELASTIZITAETSMODUL DES KAEFIGS
C COMMON /KRIT/       : EINZELKRAEFTE UND -REIBLEISTUNGEN IN DEN
C                   : SCHMIERSPALTEN DES DREHENDEN LAGERRINGES
C COMMON /ZEIT/       : ANGABEN ZUR ECHTZEIT UND SCHRITTWEITE INNER-
C                   : HALB DER RUNGE - KUTTA RECHNUNG
C COMMON /DATUMM/     : MERKER FUER DATUM, ZEIT
C
C VERWENDETE UP: DATUMZ, LAGER, GRENZE, AUSG, DATEI, BUFFER
C
C STAND          : 08.04.1987
C
C -----
C
C IMPLICIT REAL (M)
C CHARACTER DAT1*10,TIM1*10,DAT2*10,TIM2*10,TITELM*20
C CHARACTER FN1*10, FN2*10, FN3*10, FN4*10, FN5*10, FN6*10, FN7*10
C CHARACTER TITEL*20
C REAL RP(44),BP(44),AP(44),R(44),B(44),WR(44),WT(44),D(44)
C REAL FRESR(44),FRESB(44),MRES(44)
C REAL GR(5,3),GK(9,3)
C REAL FWR(44),FWT(44),MD(44)
C REAL UR(408,3),UT(408,3),UM(408,3)
C REAL FXSI(44),FETA(44),PR(44),FM(8)
C COMMON /KANAL/ KANAL1,KANAL2,KANAL3,KANAL4,KANAL5,KANAL6,KANAL7
C COMMON /FILENAM/ FN1, FN2, FN3, FN4, FN5, FN6, FN7
C COMMON /GRENZ/ GR,GK
C COMMON /KVER/ FWR,FWT,MD,NKN,UR,UT,UM
C COMMON /FLAGS/ IKFIA,ITKG,IKSE
C COMMON /KIN/ RP,BP,AP,R,B,EP,BEP,AKP,EK,BEK,AK,WR,WT,D
C COMMON /RESU/ FRESR,FRESB,MRES,FRESKE,FRESKB,MRESK
C COMMON /GEO/ PI,PI2,PIH,RIC,RAC,RKTC,RKIC,RKAC,RTC,RWC,BWC,RSOC,
```

```
&EAC, BEAC, EIC, BEIC, OMSOC, OMSOPC, BEAPC, MW, MK, TETA W, TETA K, NW, GAMA,
&BEIPC, EIA, GAMI, DELA, DELI, RBKC, RBRC, BBC, BLAST1, BLAST2,
&GFIW, GFAW, GFWK, GFIBK, GFABK, GFW, GFWKK, RKNC, RKRC
COMMON /MUE/ MUETR
COMMON /EMOD/ EMODK, FEMODR
COMMON /KRIT/ FXSI, FETA, FXSIBD, FETABD, PR, PRBD, FM, K
COMMON /ZEIT/ DT, T, IZS, IZV, IDTK
COMMON /DATUMM/ CPMERK, NTAG
DATA TITEL /'                               '/

C
C... KANAL1: EINGABE VON TASTATUR
      KANAL1=5
C... KANAL2: AUSGABE AUF BILDSCHIRM
      KANAL2=6
C... KANAL3: EINGABEDATEI FUER GEOMETRIE UND STARTWERTE
      KANAL3=3
C... KANAL4: AUSGABEDATEI FUER ENDERGESBNISSE
      KANAL4=4
C... KANAL5: AUSGABEDATEI FUER ZWISCHENERGESBNISSE (RESTART, PLOTTEN)
      KANAL5=1
C... KANAL6: EINGABEDATEI FUER KAEFIG-EINFLUSSZAHLEN
      KANAL6=2
C... KANAL7: DATEI FUER FEHLERMELDUNGEN
      KANAL7=7

C
C... FN1 .. FN7 : DATEINAMEN FUER DIE KANA ELE 1 BIS 7
C
      FN1='IN'
      FN2='OUT'
      FN3='EIN'
      FN4='AUS'
      FN5='DATEN'
      FN6='VRTM'
      FN7='FEHLER'

C
      OPEN (KANAL1, FILE=FN1)
      OPEN (KANAL2, FILE=FN2)
      OPEN (KANAL3, FILE=FN3)
      OPEN (KANAL4, FILE=FN4)
      OPEN (KANAL5, FILE=FN5)
      OPEN (KANAL6, FILE=FN6)
      OPEN (KANAL7, FILE=FN7)
      REWIND KANAL3
C... KONSTANTE
      CALL DATUMZ(DAT1, TIM1, CPU1)
      PI=4.*ATAN(1.)
      PI2=2.*PI
      PIH=PI/2.
      DTM=0.
      WRITE(KANAL2, 1984)
1984  FORMAT(/)
      WRITE(KANAL2, 3337)
3337  FORMAT(1X, 75('-',))
      WRITE(KANAL2, 1982) DAT1, TIM1
1982  FORMAT(1X, ' RLSI V5.8           PRO-START : ', 2A11)
      WRITE(KANAL2, 3337)
      WRITE(KANAL2, 1983)
1983  FORMAT(10(/))

C
C... VOREINSTELLUNGEN
      RGES=0.
      DT=1.E-9
      III=1
      IAUS=0
      ZEIT=1.E10
      MUETR=0.1
      WRITE(KANAL2, 1000) RGES, DT, III, IAUS, ZEIT, MUETR
1000  FORMAT(////, 8X,
```

```
&' +T/N ? [',1PE9.2,']          (-:AUTOMATISCHER ABRUCH)' ,/,8X,  
&' +DT ? [',1PE9.2,']          (-:KONST. SCHRITTWEITE )',/,8X,  
&' NAUS ? [', I9,']           ( KEINE AUSGABE )',/,8X,  
&' DAUS ? [', I9,']           ( KEINE AUSGABE )',/,8X,  
&' ZEIT ? [',1PE9.2,']         ( RECHENZEIT [H] )',/,8X,  
&' MUETR ? [',1PE9.2,']',/,6X,'? ' )  
  READ(KANAL1,*) RGES,DT,III,IAUS,ZEIT,MUETR  
  IAB=0  
  IF(RGES.LT.0.) IAB=1  
  RGES=ABS(RGES)  
  IDTK=0  
  IF(RGES.LT.1.) TEND=ABS(RGES)  
  IF(DT.LT.0..OR.RGES.GE.1) IDTK=1  
  DT=ABS(DT)  
  IKSCH=1  
  IF(III.LT.0) IKSCH=0  
  III=IABS(III)  
  KFORM=0  
  IF(IAUS.LT.0) THEN  
    KFORM=1  
    IAUS=0  
  ENDIF  
C  
C...  STARTWERTE  
      CPLIM=ZEIT*3600.  
      CPMERK=-1.  
      NTAG=0.  
      T=0.  
      DO 6 J=1,8  
6      FM(J)=0.  
      EKIN=0.  
      PREIB=0.  
      RES=0.  
      GAMMA=0.  
      SBP=0.  
      SAP=0.  
      SMDT=0.  
      PMDT=0.  
      RMDT=0.  
      GMDT=0.  
      TP=0.  
      BB1=0.  
      RMERK=0.  
      GMERK=0.  
      SMERK=0.  
      PMERK=0.  
      IFEHL=0  
      IZS=0  
      CALL LAGER(BPR,APR,EKIN1,TITEL,IFEHL)  
      IMERK=IZS  
      MKMERK=MK  
      IF(IFEHL.EQ.1) GOTO 2754  
      TITELM=TITEL  
9000  WRITE(KANAL2,9000) TITELM  
8000  FORMAT(/,/,/,8X,'ARBEITSTITEL :',/,1X,'(',A20,')',/,1X,'?')  
      FORMAT(A20)  
      READ(KANAL1,8000) TITEL  
      IF(TITEL.EQ.' ') TITEL=TITELM  
      WRITE(KANAL2,3337)  
      IF(RGES.EQ.0.) GOTO 8473  
      B1MERK=B(1)  
      IF(RGES.GE.1.) THEN  
        TEND=ABS(RGES*DT)+T  
        IGES=IFIX(RGES)+IZS  
      END IF  
      IF(T.GE.TEND) THEN  
3338  WRITE(KANAL2,3338)  
      FORMAT(1X,'**** ENDE DER RECHNUNG (T>TEND) ****')
```

```
GOTO 5
END IF
WRITE(KANAL2,3337)
CALL GRENZE(NW)
TANF=T
TRECH=TEND-TANF
TQ=100.
IF(III.GT.0) TQ=TEND/III
IF(IDTK.EQ.1) THEN
  IF(III.GT.0) TQ=TRECH/III
END IF
TV=TQ+TANF
TM=TANF
IF(RGES.LT.1.) THEN
  IGES=999999
  IF(IDTK.EQ.1) IGES=IFIX(TRECH/(DT)+0.5)+IZS
END IF
RZS=0.
NUM=10
IZV=0
  IF(IAUS.NE.0) THEN
    CALL AUSG(TITEL,B(1),RMERK,GMERK,PMERK,
    & III,TP,IAB,DAT1,TIM1,CPU1,KANAL2,SMERK,IMERK)
    WRITE(KANAL2,1234)
    1234  FORMAT(1X,'GRENZEN WAELZKOERPER')
    DO 18 I=1,5
    18   WRITE(KANAL2,3334) I,GR(I,1),GR(I,2),IFIX(GR(I,3))
    3334  FORMAT(I2,1P2E16.6,I7)
    WRITE(KANAL2,1235)
    1235  FORMAT(1X,'GRENZEN KAEFIG')
    DO 19 I=1,6
    19   WRITE(KANAL2,3334) I,GK(I,1),GK(I,2),IFIX(GK(I,3))
    ENDIF
  IF(IKSCH.EQ.1) THEN
    IF(BEAPC.NE.0.) MREIB=PREIB/ABS(BEAPC)
    IF(BEIPC.NE.0.) MREIB=PREIB/ABS(BEIPC)
    IF(KFORM.EQ.0) THEN
      IF(IGES.NE.999999) WRITE(KANAL2,3333) IZS,IGES,T,MREIB
      IF(IGES.EQ.999999) WRITE(KANAL2,3335) IZS,TEND,T,DT,MREIB
    ELSE
      WRITE(KANAL2,3336) IZS,T,MREIB
    ENDIF
    CALL DATEI(2,KANAL5,TITEL,IZS,T,DAT1,TIM1,EKIN,PREIB,RES,
    & GAMMA,SBP,SAP,FM,IFMELD)
    CALL BUFFER(KANAL2,FN2)
  ENDIF
C
C... VORBELEGUNG FUER AUTOMATISCHEN ABRUCH
EKIN1=0.
VB=RED(B(1))*SIGN(1.,BPR)
IWK=1
DO 21 J=1,NW
IF(VB.LT.(RED(B(J))*SIGN(1.,BPR))) THEN
  VB=RED(B(J))*SIGN(1.,BPR)
  IWK=J
END IF
21 CONTINUE
IF(IAB.EQ.1) WRITE(KANAL2,1539) IWK
1539  FORMAT(1X,'WAELZKOERPER NR.',I3,' VOR NULLDURCHGANG')
IF(T.EQ.0.) THEN
  DO 10 J=1,NW
  10  EKIN1=EKIN1+(MW*(RP(J)**2+(R(J)*BP(J)**2)+TETA*W*AP(J)**2)/2.
      EKIN1=EKIN1+(MK*(EP**2+(EK*BEP)**2)+TETA*K*AKP**2)/2.
  EPS=0.1*EKIN1
END IF
C
C... ZEITVERLAUF
IZS=IZS+1
```

```
1 CONTINUE
  PRBD=0.
  FXSIBD=0.
  FETABD=0.
  MK=MKMERK
  CALL DELTAT(NW,DTM,TEND,KFORM,IFEHL)
  EKIN=0.
  F1=FXSIBD
  F2=FETABD
  PREIB=PRBD
  APMIT=0.
  BPMIT=0.
  DO 2 J=1,NW
    F1=F1+FXSI(J)
    F2=F2+FETA(J)
    PREIB=PREIB+PR(J)
    EKIN=EKIN+(MW*(RP(J)**2+(R(J)*BP(J))**2)+TETA*AP(J)**2)
    & /2.
    APMIT=APMIT+AP(J)
2  BPMIT=BPMIT+BP(J)
  EKIN=EKIN+(MK*(EP**2+(EK*BEP)**2)+TETA*AKP**2)/2.
  RES=SQRT(F1*F1+F2*F2)
  GAMMA=0.
  IF(RES.NE.0.) GAMMA=ASIN(-F2/RES)/PI*180.
  IF(BPR.NE.0.) SBP=(BPMIT/NW-BPR)/BPR*100.
  IF(APR.NE.0.) SAP=(APMIT/NW-APR)/APR*100.
  IF(IFEHL.EQ.1) GOTO 11
C
  IF(T.GE.TV.OR.T.GE.TEND) THEN
    TV=TV+TQ
    IF(BEAPC.NE.0.) MREIB=PREIB/ABS(BEAPC)
    IF(BEIPC.NE.0.) MREIB=PREIB/ABS(BEIPC)
    IF(KFORM.EQ.0) THEN
      IF(IGES.NE.999999) WRITE(KANAL2,3333) IZS,IGES,T,MREIB
      IF(IGES.EQ.999999) WRITE(KANAL2,3335) IZS,TEND,T,DT,MREIB
    ELSE
      WRITE(KANAL2,3336) IZS,T,MREIB
    ENDIF
    CALL BUFFER(KANAL2, FN2)
3333  FORMAT(1X,'I=',I7,' IEND=',I7,
    & ' T=',1PE10.4,' M=',1PE10.3)
3335  FORMAT(1X,'I=',I7,' TEND=',
    & 1PE10.4,' T=',1PE10.4,' DT=',1PE10.4,' M=',1PE10.3)
3336  FORMAT(I7,1P2E10.4)
    CALL DATEI(-2,KANAL5,TITEL,IZS,T,DAT1,TIM1,EKIN,PREIB,RES,
    & GAMMA,SBP,SAP,FM,IFMELD)
    CALL BUFFER(KANAL5, FN5)
  END IF
C
15  PMDT=PMDT+PREIB*DTM
    SMDT=SMDT+SBP*DTM
    RMDT=RMDT+RES*DTM
    GMDT=GMDT+GAMMA*DTM
C... TEST AUF ABRUCH DER RECHNUNG
    IF(IAB.EQ.0) GOTO 22
    BE=RED(B(IWK))
    IF(BPR.GT.0..AND.BE.GT.PI) GOTO 22
    IF(BPR.LT.0..AND.BE.LT.PI) GOTO 22
    TP=T-TM
    TM=T
    SMERK=SMDT/DT
    PMERK=PMDT/TP
    RMERK=RMDT/TP
    GMERK=GMDT/TP
    SMDT=0.
    PMDT=0.
    RMDT=0.
    GMDT=0.
```

```
DEKIN=ABS((EKIN1-EKIN)/EKIN)
IF(DEKIN.LT.EPS) THEN
  WRITE(KANAL2,6853) T
6853   FORMAT(1X,'AUTOMATISCHER ABRUCH DER RECHNUNG BEI T =',
&      1PE15.6)
      GOTO 11
      END IF
      EKIN1=EKIN
      IWK=IWK-IFIX(SIGN(1.,BPR))
      IF(IWK.EQ.0) IWK=NW
      IF(IWK.EQ.(NW+1)) IWK=0
22 CONTINUE
      CALL DATUMZ(DAT2,TIM2,CPUV)
      IF(T.GE.TEND.OR.(CPUV-CPU1).GT.CPLIM) GOTO 11
      IZS=IZS+1
      GOTO 1
C...  AUSWERTUNG DER RECHNUNG
11 CONTINUE
      IF(TM.EQ.TANF) THEN
          TP=T-TANF
          SMERK=SMDT/TP
          PMERK=PMDT/TP
          RMERK=RMDT/TP
          GMERK=GMDT/TP
      END IF
      IF(BEAPC.NE.0.) MRMI=PMERK/ABS(BEAPC)
      IF(BEIPC.NE.0.) MRMI=PMERK/ABS(BEIPC)
      WRITE(KANAL2,3337)
      WRITE(KANAL2,9876) MRMI
9876  FORMAT(1X,' MITTLERES REIBMOMENT (NM) =',1PE10.3)
C
C...  LETZTE WERTE AUF FN3, FN5 ABLEGEN FUER NAECHSTE RECHNUNG
8473  REWIND KANAL3
      MK=MKMERK
      CALL DATEI(2,KANAL3,TITEL,IZS,T,DAT1,TIM1,EKIN,PREIB,RES,
&      GAMMA,SBP,SAP,FM,IFMELD)
      CALL AUSG(TITEL,B(1),RMERK,GMERK,PMERK,III,TP,IAB,
&      DAT1,TIM1,CPU1,KANAL4,SMERK,IMERK)
      ENDFILE KANAL3
      CALL DATEI(-2,KANAL5,TITEL,IZS,T,DAT1,TIM1,EKIN,PREIB,RES,
&      GAMMA,SBP,SAP,FM,IFMELD)
      ENDFILE KANAL5
C
5 CONTINUE
2754  IF(IFEHL.EQ.1) THEN
      WRITE(KANAL2,5684)
      WRITE(KANAL7,5684)
      ENDIF
5684  FORMAT(//,1X,'***** ABRUCH DER RECHNUNG ! *****',///)
      WRITE(KANAL2,2337)
2337  FORMAT(1X,33('-'),'RLSI V5.8',33('-'))
      STOP
      END
```

```
C -----
C LAGER      LIEST DIE LAGERDATEN EIN UND BESTIMMT DIE ANFANGSWERTE
C =====
C           FUER DIE RUNGE-KUTTA RECHNUNG
C
C E:  NW      ANZAHL DER WAE LZKOE RPER
C      RWC     RADIUS DER WAE LZKOE RPER
C      BWC     BREITE DER WAE LZKOE RPER
C      MW      MASSE EINES WAE LZKOE RPERS
C      TETAW   MASSENTRAE GHEITSMOMENT EINES WAE LZKOE RPERS
C
C      RIC     RADIUS DES INNENRINGS
C      EIC     EXZENTRIZITA ET DES INNENRINGS
C      BEIC    EXZENTRIZITA ETSWINKEL DES INNENRINGS
C      BEIPC   WINKELGESCHWINDIGKEIT DES INNENRINGS
C
C      RAC     RADIUS DES AUSSENRINGS
C      EAC     EXZENTRIZITA ET DES AUSSENRINGS
C      BEAC    EXZENTRIZITA ETSWINKEL DES AUSSENRINGS
C      BEAPC   WINKELGESCHWINDIGKEIT DES AUSSENRINGS
C
C      RKTC    RADIUS DER TASCHE NMITTELPUNKTE
C      RTC     RADIUS DER KAE FIGTASCHE N
C      RKIC    RADIUS DES KAE FIGINNENRINGES
C      RKAC    RADIUS DES KAE FIGAUSSENRINGES
C      MK      MASSE DES KAE FIGS
C      TETAK   MASSENTRAE GHEITSMOMENT DES KAE FIGS
C
C      RKNC    KNOTENPUNKTRADIUS DES KAE FIG - ERSATZRINGS
C      EMO DK  ELASTIZITA ETSMODUL DES KAE FIGS
C      RKRC    STEGKANTENRADIUS DER TASCHE
C
C      RBRC    RADIUS DES FUE HRUNGSBORDES
C      RBKC    RADIUS DES KAE FIGBORDES
C      BBC     GEMEINSAME BREITE DER BORDE
C
C      RSOC    ACHSABSTAND DES PLANETENGETRIEBES
C      OMSOC   WINKELGESCHWINDIGKEIT DES PLANETENRADTRAE GERS
C      OMSOPC  WINKELBESCHLEUNIGUNG DES PLANETENRADTRAE GERS
C
C A:  RP      RADIALGESCHWINDIGKEIT DER WAE LZKOE RPERMITTELPKTE
C      BP      WINKELGESCHWINDIGKEIT DER WAE LZKOE RPERMITTELPKTE
C      AP      WINKELGESCHWINDIGKEIT DER WAE LZKOE RPER
C      R       LAGERRADIUS DER WAE LZKOE RPER
C      B       LAGEWINKEL DER WAE LZKOE RPER
C      EP      RADIALGESCHWINDIGKEIT DER KAE FIGEXZENTRIZITA ET
C      BEP     TANGENTIALGESCHWINDIGKEIT DER KAE FIGEXZENTRIZITA ET
C      AKP     WINKELGESCHWINDIGKEIT KAE FIG <-> PLANETENRADTRAE GER
C      EK      EXZENTRIZITA ET DES KAE FIGS
C      BEK     LAGEWINKEL DER KAE FIGEXZENTRIZITA ET
C      AK      LAGEWINKEL DER KAE FIGTASCHE 1
C      ITKG    TASCHE KREISFOERMIG :=0, GERADE:=1
C      IKFIA   INNENBORDFUE HRUNG :=1, AUSSENBORDFUE HRUNG :=2
C              WAE LZKOE RPERFUE HRUNG :=0
C      IKSE    KAE FIG STARR :=0, ELASTISCH :=1
C      BPR     WAE LZKOE RPER-WINKELGESCHW. IM IDEALEN LAGER IN B-RICHTG.
C      APR     WAE LZKOE RPER-WINKELGESCHW. IM IDEALEN LAGER IN A-RICHTG.
C      /KANAL/ NUMMERN DER EIN/AUSGABEKANA ELE
C      /FILENAM/ NAMEN DER EIN/AUSGABEKANA ELE
C      /KVER/   KRAEFTE UND EINFLUSSZAHLEN FUER KAE FIG-
C              VERFORMUNG
C      /FLAGS/  FLAGS FUER KAE FIGBAUART UND -VERFORMUNG
C      /KIN/    KINEMATIKGRO E SSEN VON WAE LZKOE RPERN UND
C              KAE FIG, KAE FIGVERFORMUNGEN
C      /GEO/    LAGER - GEOMETRIEGRO E SSEN
C      /EMOD/   ELASTIZITA ETSMODUL DES KAE FIGS
C      /ZEIT/   ANGABEN ZUR ECHTZEIT UND SCHRITTWEITE INNER-
C              HALB DER RUNGE - KUTTA RECHNUNG
C
```

```
C VERWENDETE UP: DATEI, KARPOL
C -----
C
C SUBROUTINE L A G E R (BPR,APR,EKIN,TITEL,IFEHL)
C IMPLICIT REAL (M)
C DOUBLE PRECISION BJJ
C INTEGER FLAGD
C REAL NENNER,FM(8)
C CHARACTER FN1*10, FN2*10, FN3*10, FN4*10, FN5*10, FN6*10, FN7*10
C CHARACTER TITEL*20, DAT*10, TIM*10
C REAL RP(44),BP(44),AP(44),R(44),B(44),WR(44),WT(44),D(44)
C REAL FWR(44),FWT(44),MD(44)
C REAL UR(408,3),UT(408,3),UM(408,3)
C COMMON /FILENAM/ FN1, FN2, FN3, FN4, FN5, FN6, FN7
C COMMON /KANAL/ KANAL1, KANAL2, KANAL3, KANAL4, KANAL5, KANAL6, KANAL7
C COMMON /KIN/ RP, BP, AP, R, B, EP, BEP, AKP, EK, BEK, AK, WR, WT, D
C COMMON /GEO/ PI, PI2, PIH, RIC, RAC, RKTC, RKIC, RKAC, RTC, RWC, BWC, RSOC,
&EAC, BEAC, EIC, BEIC, OMSOC, OMSOPC, BEAPC, MW, MK, TETAW, TETAK, NW, GAMA,
&BEIPC, EIA, GAMI, DELA, DELI, RBKC, RBRC, BBC, BLAST1, BLAST2,
&GFIW, GFAW, GFWK, GFIBK, GFABK, GFW, GFWKK, RKNC, RKRC
C COMMON /KVER/ FWR, FWT, MD, NKN, UR, UT, UM
C COMMON /EMOD/ EMODK, FEMODR
C COMMON /FLAGS/ IKFIA, ITKG, IKSE
C COMMON /ZEIT/ DT, T, IZS, IZV, IDTK
C AA=0.
C BB=0.
C FLAGD=1
C WRITE(KANAL2,3300)
3300 FORMAT(////,8X,'LESEN ? (DATEI:+IZS,-T / TERMINAL:-99) ')
C READ(KANAL1,*) RV
C WRITE(KANAL2,1982)
1982 FORMAT(////)
C RVM=RV
C IF(RV.EQ.-99.) GOTO 10
C... RV = ZEITSCHRITT ODER ZEIT ?
C IFTI=1
C IF(RV.GE.0.) THEN
C IV=IFIX(RV)
C IFTI=0
C END IF
C RV=ABS(RV)
C 2 CONTINUE
C CALL DATEI(FLAGD,KANAL3,TITEL,IZS,T,DAT,TIM,AA,BB,CC,DD,EE,FF,FM,
& IFMELD)
C FLAGD=-1
C IF(IFMELD.EQ.1) GOTO 12
C IF(IFMELD.EQ.2) GOTO 4999
C IF(IZS.LT.IV.AND.IFTI.EQ.0) GOTO 2
C IF(T.LT.RV.AND.IFTI.EQ.1) GOTO 2
C GOTO 22
C 12 WRITE(KANAL2,1999)
C WRITE(KANAL7,1999)
1999 FORMAT(///,1X,'***** FEHLER IN EINGABEDATEI *****')
C GOTO 40
C 10 WRITE(KANAL2,2000)
2000 FORMAT(1X,'NW, RWC, BWC, MW, TETAW ?')
C ASSIGN 10 TO IL
C READ(KANAL1,*,ERR=3008,END=3008) RNW,RWC,BWC,MW,TETAW
C NW=IFIX(RNW)
3001 WRITE(KANAL2,2001)
2001 FORMAT(1X,'RIC, EIC, BEIC, BEIPC ?')
C ASSIGN 3001 TO IL
C READ(KANAL1,*,ERR=3008,END=3008) RIC,EIC,BEIC,BEIPC
3002 WRITE(KANAL2,2002)
2002 FORMAT(1X,'RAC, EAC, BEAC, BEAPC ?')
C ASSIGN 3002 TO IL
C READ(KANAL1,*,ERR=3008,END=3008) RAC,EAC,BEAC,BEAPC
```

```
3003 WRITE(KANAL2,2003)
2003 FORMAT(1X,'RKTC, RTC, RKIC, RKAC, MK, TETAK ?')
      ASSIGN 3003 TO IL
      READ(KANAL1,*,ERR=3008,END=3008) RKTC,RTC,RKIC,RKAC,MK,TETAK
      IF(RKTC.EQ.10.) THEN
          ITKG=1
          WRITE(KANAL2,2015) RTC
2015 FORMAT(/,1X,'GERADE TASCHENKONTUR: HALBE TASCHENBREITE =',1PE15.8)
      ENDIF
      IF(RKTC.EQ.0.) THEN
          ITKG=2
          WRITE(KANAL2,2016)
2016 FORMAT(1X,'LAGER VOLLROLLIG ! KAEFIG-GEOMETRIE WIRD IGNORIERT.')
      ENDIF
      IF(RKTC.GT.0..AND.RKTC.NE.10.) THEN
          ITKG=0
          WRITE(KANAL2,2017) RTC
2017 FORMAT(/,1X,'KREISFOERMIGE TASCHENKONTUR: TASCHENRADIUS =',
&1PE15.8)
      ENDIF
3004 WRITE(KANAL2,2004)
2004 FORMAT(1X,'RKNC, EMODK, RKRC ?')
      ASSIGN 3004 TO IL
      READ(KANAL1,*,ERR=3008,END=3008) RKNC,EMODK,RKRC
      IF(RKNC.GT.0.) THEN
          WRITE(KANAL2,2014)
2014 FORMAT(/,1X,'ELASTISCHER KAEFIG ! (DATEI: VRTM)',/)
          IKSE=1
      ELSE
          IKSE=0
          RKNC=-RKNC
      ENDIF
      IF(RKIC.LT.0.) THEN
3005 WRITE(KANAL2,2005)
2005 FORMAT(/,1X,'INNENBORDFUEHRUNG: RBRC, RBKC, BBC ?')
      ASSIGN 3005 TO IL
      READ(KANAL1,*,ERR=3008,END=3008) RBRC,RBKC,BBC
          IKFIA=1
          RKIC=-RKIC
      END IF
      IF(RKAC.LT.0.) THEN
3006 WRITE(KANAL2,2006)
2006 FORMAT(/,1X,'AUSSENBORDFUEHRUNG: RBRC, RBKC, BBC ?')
      ASSIGN 3006 TO IL
      READ(KANAL1,*,ERR=3008,END=3008) RBRC,RBKC,BBC
          IKFIA=2
          RKAC=-RKAC
      END IF
3007 WRITE(KANAL2,2007)
2007 FORMAT(1X,'RSOC OMSOC OMSOPC ?')
      ASSIGN 3007 TO IL
      READ(KANAL1,*,ERR=3008,END=3008) RSOC,OMSOC,OMSOPC
          GOTO 22
4999 WRITE(KANAL2,4998) IZS,T
4998 FORMAT(1X,'ENDE DER EINGABEDATEI GEFUNDEN !',/,1X,
&'ES WIRD GERECHNET AB : I=',I7,' T=',E15.6)
          GOTO 22
3008 CLOSE(KANAL1)
      OPEN(KANAL1,FILE=FN1)
      WRITE(KANAL2,3009)
3009 FORMAT(30X,'** BITTE EINGABE WIEDERHOLEN **'/)
          GOTO IL
22 CONTINUE
C
C... EINLESEN DER VERFORMUNGSDATEI (KANAL6)
C
      IF(IKSE.EQ.1) THEN
          REWIND 6
```

```
      READ(KANAL6,4005,END=4001,ERR=4001) NKN,AAA,BBB,CCC
4005  FORMAT(I4,3E16.9)
      IF(NKN.NE.NW) THEN
          WRITE(KANAL2,4004)
          WRITE(KANAL7,4004)
4004  FORMAT(//,5X,'**** ANZAHL WAELZKOERPER <> ANZAHL KNOTEN ****')
          GOTO 4001
      ENDIF
      GOTO 17
4001  WRITE(KANAL2,4002)
      WRITE(KANAL7,4002)
4002  FORMAT(//,1X,'***** FEHLER IN DATEI VRM *****',//)
      GOTO 40
      17  DO 14 I=1,NKN
      14  READ(KANAL6,4003,END=4001,ERR=4001)
          & UR(I,1),UR(I,2),UR(I,3)
          DO 15 I=1,NKN
      15  READ(KANAL6,4003,END=4001,ERR=4001)
          & UT(I,1),UT(I,2),UT(I,3)
          DO 16 I=1,NKN
      16  READ(KANAL6,4003,END=4001,ERR=4001)
          & UM(I,1),UM(I,2),UM(I,3)
          DO 1393 I1=1,NKN
          DO 1393 I2=1,3
          UR(I1,I2)=UR(I1,I2)/EMODK
          UT(I1,I2)=UT(I1,I2)/EMODK
1393  UM(I1,I2)=UM(I1,I2)/EMODK
      ENDIF
4003  FORMAT(3E21.14)
C
C...  UEBERPRUEFUNG AUF SINNVOLLE EINGABEDATEN
C
      IF(RBRC.LT.0..OR.RBKC.LT.0..OR.BBC.LT.0.) WRITE(KANAL2,1120)
      IF(RIC.LT.0..OR.RAC.LT.0..OR.RKTC.LT.0..OR.RKIC.LT.0..OR.
&RKAC.LT.0..OR.RTC.LT.0..OR.RWC.LT.0..OR.BWC.LT.0..OR.RSOC.LT.0..OR
&.MW.LT.0..OR.MK.LT.0..OR.TETAW.LT.0..OR.TETAK.LT.0.)
& WRITE(KANAL2,1100)
      RIC=ABS(RIC)
      RAC=ABS(RAC)
      RKTC=ABS(RKTC)
      RBRC=ABS(RBRC)
      RBKC=ABS(RBKC)
      BBC=ABS(BBC)
      RTC=ABS(RTC)
      RWC=ABS(RWC)
      BWC=ABS(BWC)
      RSOC=ABS(RSOC)
      MW=ABS(MW)
      MK=ABS(MK)
      TETAW=ABS(TETAW)
      TETAK=ABS(TETAK)
      IF(ABS(RKTC-(RAC+RIC)/2.)>.1.E-5.AND.ITKG.EQ.0) THEN
          WRITE(KANAL2,1123)
          WRITE(KANAL7,1123)
      ENDIF
      IF(BEAPC.EQ.0..AND.BEIPC.EQ.0.) THEN
          WRITE(KANAL2,1124)
          WRITE(KANAL7,1124)
      ENDIF
      IF(RIC.GE.RAC) THEN
          WRITE(KANAL2,1010)
          WRITE(KANAL7,1010)
          GOTO 40
      END IF
      RWMAX=(RIC+RAC)/2.*SIN(PI/FLOAT(NW))
      IF(RWC.GT.RWMAX) THEN
          WRITE(KANAL2,1011)
          WRITE(KANAL7,1011)
```

```
GOTO 40
END IF
EIAX=EAC*SIN(BEAC)-EIC*SIN(BEIC)
EIAIY=EAC*COS(BEAC)-EIC*COS(BEIC)
CALL KARPOL(EIAX,EIAIY,EIA,BIA)
ILV=0
IF(RAC-RIC+EIA.LT.(2.*RWC))THEN
  ILV=1
  WRITE(KANAL2,1020)
  WRITE(KANAL7,1020)
END IF
ILU=0
IF(RAC-RIC-EIA.GT.(2.*RWC))THEN
  ILU=1
  WRITE(KANAL2,1030)
  WRITE(KANAL7,1030)
END IF
IF(RKAC.LE.RKIC.AND.ITKG.LT.2) THEN
  WRITE(KANAL2,1040)
  WRITE(KANAL7,1040)
ENDIF
IF(BEAC.GE.PI2) THEN
  WRITE(KANAL2,1060)
  WRITE(KANAL7,1060)
ENDIF
IF(BEIC.GE.PI2) THEN
  WRITE(KANAL2,1060)
  WRITE(KANAL7,1060)
ENDIF
IF(RTC.LE.RWC.AND.ITKG.LT.2) THEN
  WRITE(KANAL2,1070)
  WRITE(KANAL7,1070)
ENDIF
IF(NW.EQ.0.OR.NW.GT.44) THEN
  WRITE(KANAL2,1080)
  WRITE(KANAL7,1080)
ENDIF
IF(EIC.EQ.0..AND.EAC.EQ.0.) THEN
  WRITE(KANAL2,1130)
  WRITE(KANAL7,1130)
ENDIF
ZO=1.
IF(ITKG.LT.2) ZO=RKTC*RKIC*RKAC*RTC*MK*TETAK
ZO=RAC*RIC*RWC*BWC*MW*TETA*W*ZO
IF(ZO.EQ.0.) THEN
  WRITE(KANAL2,1090)
  WRITE(KANAL7,1090)
  GOTO 40
END IF
Z1=RBRC*RBKC*BBC
IF(Z1.EQ.0..AND.IKFIA.GT.0) THEN
  WRITE(KANAL2,1110)
  WRITE(KANAL7,1110)
  GOTO 40
END IF
IF((BEIPC*BEAPC).NE.0.) THEN
  WRITE(KANAL2,1140)
  WRITE(KANAL7,1140)
  GOTO 40
END IF
1010 FORMAT(////,1X,'***** FEHLER ***** : EINGABEDATEN'
&,' NICHT SINNVOLL !',//,1X,'(RIC, RAC)',////)
1011 FORMAT(////,1X,'***** FEHLER ***** : '
&,' ZUVIELE WAELZKOERPER !',//,1X,'(NW, RIC, RAC)',////)
1020 FORMAT(////,1X,'***** WARNUNG ***** : LAGER'
&,' VORGESpanNT !',//,1X,'(RIC, RAC, RWC)',////)
1030 FORMAT(////,1X,'***** WARNUNG ***** : LAGER'
&,' UNBELASTET !',//,1X,'(RIC, RAC, RWC, EAC/EIC)',////)
```

```
1040 FORMAT(////,1X,'***** WARNUNG ***** : EINGABEDATEN'  
&,' NICHT SINNVOLL !',//,1X,'(RKIC, RKAC)',////)  
1060 FORMAT(////,1X,'***** WARNUNG ***** : EINGABEDATEN'  
&,' NICHT SINNVOLL !',//,1X,'(BEAC/BEIC)',////)  
1070 FORMAT(////,1X,'***** WARNUNG ***** : EINGABEDATEN'  
&,' NICHT SINNVOLL !',//,1X,'(RTC, RWC)',////)  
1080 FORMAT(////,1X,'***** WARNUNG ***** : EINGABEDATEN'  
&,' NICHT SINNVOLL !',//,1X,'( NW )',////)  
1090 FORMAT(////,1X,'***** FEHLER ***** : EINGABEDATEN'  
&,' NICHT SINNVOLL !',//,1X,'***** EINGABEWERT = 0',//,  
&,'(RIC, RAC, RKTC, RKIC, RKAC, RTC, RWC, BWC, MW, MK, TETAW,'  
&,' TETAK)',////)  
1100 FORMAT(////,1X,'***** WARNUNG ***** : EINGABEDATEN'  
&,' NICHT SINNVOLL !',//,1X,'***** EINGABEWERT NEGATIV',//,'(RIC',  
&,' RAC, RKTC, RKIC, RKAC, RTC, RWC, BWC, MW, MK, TETAW, TETAK)',//,  
&'ES WIRD MIT DEM(N) ABSOLUTWERT(EN) WEITERGERECHNET !',////)  
1110 FORMAT(////,1X,'***** FEHLER ***** : EINGABEDATEN'  
&,' NICHT SINNVOLL !',//,1X,'***** EINGABEWERT = 0',////,  
&'(RBRC, RBKC, BBC)')  
1120 FORMAT(////,1X,'***** WARNUNG ***** : EINGABEDATEN'  
&,' NICHT SINNVOLL !',//,1X,'***** EINGABEWERT NEGATIV',////,  
&'(RBRC, RBKC, BBC)',//,  
&'ES WIRD MIT DEM(N) ABSOLUTWERT(EN) WEITERGERECHNET !')  
1123 FORMAT(////,1X,'***** WARNUNG ***** :',//,' KAEFIG-',  
&'TASCHENRADIUS UNGLEICH WAELEZKEORPER-MITTENRADIUS',//)  
1124 FORMAT(////,1X,'***** WARNUNG ***** :',//,' BEIDE',  
&' LAGERRINGE STEHEN STILL ',/  
&1X,'SCHRITTWEITENSTEUERUNG NICHT MOEGLICH',//)  
1130 FORMAT(////,1X,'***** WARNUNG ***** :'  
&,'//,1X,'***** BEIDE LAGERRINGE ZENTRISCH')  
1140 FORMAT(////,1X,'***** FEHLER ***** : EINGABEDATEN'  
&,' NICHT ZULAESSIG!',//,1X,'***** BEIDE LAGERRINGE TREIBEND')
```

C
C

```
BLAST1=0.  
IF(ILV.EQ.1) BLAST2=PI2  
IF(ILU.EQ.1) BLAST2=0.  
IF((ILV+ILU).EQ.0) THEN  
  BAW1=ACOS(((RIC+RWC)**2-EIA**2-(RAC-RWC)**2)/(2.*EIA*(RAC-RWC)))  
&  
  +BIA  
  BAW2=2.*(PI+BIA)-BAW1  
  MWX1=EAC*SIN(BEAC)+(RAC-RWC)*SIN(BAW1)  
  MWY1=EAC*COS(BEAC)+(RAC-RWC)*COS(BAW1)  
  MWX2=EAC*SIN(BEAC)+(RAC-RWC)*SIN(BAW2)  
  MWY2=EAC*COS(BEAC)+(RAC-RWC)*COS(BAW2)  
  CALL KARPOL(MWX1,MWY1,RLAST1,BLAST1)  
  CALL KARPOL(MWX2,MWY2,RLAST2,BLAST2)  
182 IF(BLAST1.LT.0.) THEN  
  BLAST1=BLAST1+PI2  
  GOTO 182  
  END IF  
183 IF(BLAST2.LT.0.) THEN  
  BLAST2=BLAST2+PI2  
  GOTO 183  
  END IF  
END IF  
IF(RVM.NE.-99.) GOTO 20
```

C
C...
C

FESTLEGEN DER STARTWERTE NACH EINGABE VON TERMINAL

```
EIX=EIC*SIN(BEIC)  
EIY=EIC*COS(BEIC)  
EAX=EAC*SIN(BEAC)  
EAY=EAC*COS(BEAC)  
RIAX=0.5*(EAX-EIX)  
RIAY=0.5*(EAY-EIY)  
BPID=(BEAPC*RAC+BEIPC*RIC)/(RAC+RIC)  
RID=(RAC+RIC)/2.
```

```
C
C...  STARTWERTE FUER KAEFIG
C
C...  VORBELEGUNG FUER VOLLROLLIGE LAGER
      EP=0.
      BEP=0.
      AKP=0.
      EK=0.
      BEK=0.
      IF(ITKG.LT.2) THEN
C...  ->EXZENTRIZITAET
C...  ->EXZENTRIZITAETSWINKEL
      EKX=EIX+RIAX
      EKY=EIY+RIAY
      CALL KARPOL(EKX,EKY,EK,BEK)
      IF(EK.EQ.0.) THEN
          EK=1.E-6
          BEK=0.
      ENDIF
      189  IF(BEK.LT.0.) THEN
          BEK=BEK+PI2
          GOTO 189
      END IF
C...  ->LAGEWINKEL STEG 1 (UNVERFORMT)
      AK=0.
C...  ->WINKELGESCHWINDIGKEIT DER EIGENROTATION
      AKP=BPID*0.9
      END IF
C
C...  STARTWERTE FUER WAE LZKOERPER
C
      TEI=PI2/NW
      IF(ITKG.LT.2) THEN
          DTEI=TEI/2.
      ELSE
          DTEI=0.
      ENDIF
      RIA2=(RIC+RAC)**2
      AVERG=RID*BPID**2+2.*OMSOC*RID*BPID+OMSOC**2*(-RSOC+RID)
      CQ=-RID/RSOC*(BPID**2+2.*OMSOC*BPID+OMSOC**2)
      PQ=OMSOPC*CQ/(OMSOC**4+OMSOPC**2)
      QQ=(CQ**2-OMSOC**4)/(OMSOC**4+OMSOPC**2)
      IF(AVERG.LT.0.) THEN
          WQ=ASIN(-PQ+SQRT(PQ*PQ-QQ))
          W1=PI-WQ
          W2=PI+WQ
      ENDIF
      DO 1 J=1,NW
C...  ->LAGEWINKEL
          B(J)=(J-1)*TEI+DTEI
          SI=SIN(BEIC-B(J))
          CI=COS(BEIC-B(J))
          SA=SIN(BEAC-B(J))
          CA=COS(BEAC-B(J))
C...  ->UMLAUFWINKELGESCHWINDIGKEIT
          BP(J)=BPID
C...  ->RADIUS
C...  ZUNAECHST: ANLAGE ALLER WAE LZKOERPER AM AUSSENRING
          BJJ=DOUBLE(B(J)-BEAC)
          RAJJ=SNGL(
&DOUBLE(EAC)*DCOS(BJJ)+DSQRT(DBLE(EAC)**2*(DCOS(BJJ)**2-1.DO)+
&DBLE(RAC)**2))
          R(J)=RAJJ-RWC-1.E-6
C...  INNERHALB DER LASTZONE: WAE LZKOERPER MITTIG ZWISCHEN INNEN- UND
C...  AUSSENRING
          IF((BLAST1.GT.BLAST2.AND.(B(J).GT.BLAST1.OR.B(J).LT.BLAST2)).OR.
&(BLAST2.GT.BLAST1.AND.(B(J).GT.BLAST1.AND.B(J).LT.BLAST2))) THEN
              PIA=-SIN(B(J))*(EIX+RIAX)-COS(B(J))*(EIY+RIAY)
```

```
      QIA=EIX**2+EIY**2+RIAX**2+RIAY**2-RID**2+2.*(EIX*RIAX+EIY*RIAY)
      R(J)=-PIA+SQRT(PIA**2-QIA)
18    CONTINUE
      ELSE IF(AVERG.LT.0.) THEN
C...  LAUFBAHNWECHSEL :
C...  AUSSERHALB DER LASTZONE ANLAGE DER WAEZKOERPER
C...  AM INNEN- ODER AUSSENRING ENTSPRECHEND DER BESCHLEUNIGUNG
      IF(B(J).GT.W1.AND.B(J).LT.W2) THEN
          BJJ=DBLE(B(J)-BEIC)
          RIJJ=SNGL(
&      DBLE(EIC)*DCOS(BJJ)+DSQRT(DBLE(EIC)**2*(DCOS(BJJ)**2-1.DO)+
&      DBLE(RIC)**2))
          R(J)=RIJJ+RWC+1.E-6
      ENDIF
      ELSE
      ENDIF
      IF(ITKG.LT.2) THEN
C...  KORREKTUR VON B(J), UM MITTIGE TASCHENLAGE ZU ERREICHEN
          BKJ=AK+FLOAT(J-1)*PI2/NW-ATAN(WT(J)/RKNC)
          PTT=EK*COS(BEK-BKJ)
          RTT=-PTT+SQRT(PTT**2-EK**2+R(J)**2)
          RJX=EK*SIN(BEK)+RTT*SIN(B(J))
          RJY=EK*COS(BEK)+RTT*COS(B(J))
          CALL KARPOL(RJX,RJY,RDUM,BDUM)
24     IF(BDUM.LT.0.) THEN
          BDUM=BDUM+PI2
          GOTO 24
      ENDIF
          B(J)=BDUM
      ENDIF
C...  ->RADIALGESCHWINDIGKEIT
          WUI=SQRT(R(J)*R(J)+EIC**2-2.*R(J)*EIC*CI)
          WUA=SQRT(R(J)*R(J)+EAC**2-2.*R(J)*EAC*CA)
          RP(J)=(R(J)*BP(J)*(-EAC*SA*WUI-EIC*SI*WUA))/(WUA*(R(J)-EIC*CI)+
&WUI*(R(J)-EAC*CA))
C...  ->WINKELGESCHWINDIGKEIT DER EIGENROTATION
          AP(J)=BP(J)*(RIC/RWC+1.)-RIC/RWC*BEIPC
1     CONTINUE
C
20    CONTINUE
          BPR=(RAC*BEAPC+RIC*BEIPC)/(RAC+RIC)
          APR=BPR*(RIC/RWC+1.)
          IF(ITKG.EQ.0) THEN
              GAMA=2.*WA(RTC,RKTC,RKAC)
              GAMI=2.*WA(RTC,RKTC,RKIC)
              DELA=PI2/NW-GAMA
              DELI=PI2/NW-GAMI
          ENDIF
          IF(ITKG.EQ.1) THEN
              GAMA=2.*ASIN(RTC/RKAC)
              GAMI=2.*ASIN(RTC/RKIC)
              DELA=PI2/NW-GAMA
              DELI=PI2/NW-GAMI
          ENDIF
          RIVERG=56./9000.
          GFW=RWC*RWC/(RWC+RWC)/RIVERG
          GFIW=RIC*RWC/(RIC+RWC)/RIVERG
          GFAW=RAC*RWC/(RAC-RWC)/RIVERG
          GFWK=RWC*RTC/(RTC-RWC)/RIVERG
          GFWKK=RWC*RKRC/(RWC+RKRC)/RIVERG
          IF(ITKG.EQ.1) GFWK=RWC/RIVERG
          IF(IKFIA.EQ.1) GFIBK=RBRC*RBKC/(RBKC-RBRC)/RIVERG
          IF(IKFIA.EQ.2) GFABK=RBRC*RBKC/(RBRC-RBKC)/RIVERG
C
C...  FAKTOR FUER RESULTIERENDEN E-MODUL IN UP:DRUCK
          FEMODR=(2.1E5+EMODK)/EMODK/2.
C
7    RETURN
```

```
40 IFEHL=1  
   RETURN  
   END
```

```
C -----
C GRENZE      BESTIMMT DIE ABSOLUTEN FEHLERGRENZEN FUER DIE RUNGE-KUTTA
C =====   RECHNUNG IN ABHAENIGKEIT VON DEN STARTWERTEN DER BE-
C             TREFFENDEN KINEMATIKGROESSEN
C
C E: NW       WAELZKOERPERANZAHL
C           ITKG      FLAG FUER KAEFIG
C           /KIN/     KINEMATIKGROESSEN VON WAELZKOERPERN UND
C                   KAEFIG, KAEFIGVERFORMUNGEN
C
C A: /GRENZ/   FEHLERGRENZEN FUER AUTOMATISCHE
C             SCHRITTWEITENSTEUERUNG
C
C VERWENDETE UP: KEINE
C
C STAND       : 06.04.1987
C -----
C
```

```
      SUBROUTINE  G R E N Z E(NW,ITKG)
      IMPLICIT REAL(M)
      REAL X(44,5),XK(6),XKV(44,3),MIT(5),GR(5,3),GK(9,3)
      COMMON /GRENZ/ GR,GK
      COMMON /KIN/ X,XK,XKV
      DO 1 I=1,5
      GR(I,3)=0.
      GK(I,3)=0.
1  MIT(I)=0.
      GK(6,3)=0.
      MIT(1)=ABS(X(1,1))
      DO 2 I=1,5
      DO 2 J=1,NW
      IF(I.EQ.1) THEN
          MIT(I)=AMAX1(MIT(I),ABS(X(J,I)))
      ELSE
          MIT(I)=MIT(I)+X(J,I)
      ENDIF
2  CONTINUE
C
C...  GRENZEN FUER WAELZKOERPER
      GR(1,1)=MIT(1)/10.
      IF(GR(1,1).LT.1.E-3) THEN
          GR(1,1)=1.E-3
          GR(1,2)=1.E-5
          GOTO 4
      END IF
      GR(1,2)=MIT(1)/20.
4  DO 3 I=2,5
      GR(I,1)=ABS(MIT(I)/NW/100.)
      IF(GR(I,1).LT.1.E-10) THEN
          GR(I,1)=1.E-10
          GR(I,2)=1.E-12
          GOTO 3
      END IF
      GR(I,2)=ABS(MIT(I)/NW/200.)
3  CONTINUE
C
      IF(ITKG.EQ.2) GOTO 5
C
C...  GRENZEN FUER KAEFIG
C...  EP :
      GK(1,1)=1.E-2
      GK(1,2)=5.E-3
C...  BEP :
      GK(2,1)=10.
      GK(2,2)=5.
C...  AKP :
      GK(3,1)=GR(2,1)
```

```
GK(3,2)=GR(2,2)
C... EK :
      GK(4,1)=1.E-8
      GK(4,2)=5.E-10
C... BEK :
      GK(5,1)=1.E-3
      GK(5,2)=1.E-5
C... AK :
      GK(6,1)=GR(5,1)
      GK(6,2)=GR(5,2)
C... WR :
      GK(7,1)=1.E-6
      GK(7,2)=5.E-7
C... WT :
      GK(8,1)=1.E-6
      GK(8,2)=1.E-7
C... D :
      GK(9,1)=1.E-3
      GK(9,2)=1.E-4
5 RETURN
END
```

```
C -----
C
C DELTAT   STEUERT DIE SCHRITTWEITE DER RUNGE-KUTTA-RECHNUNG
C ===== ABHAENGIG VON DEN IN /GRENZ/ VORGEGEBENEN FEHLERGRENZEN
C
C E: /GRENZ/ FEHLERGRENZEN FUER AUTOMATISCHE
C           SCHRITTWEITENSTEUERUNG
C   /FLAGS/ FLAGS FUER KAEFIGBAUART UND -VERFORMUNG
C   /KIN/   KINEMATIKGROESSEN VON WAELZKOERPERN UND
C           KAEFIG, KAEFIGVERFORMUNGEN
C   /ZEIT/  ANGABEN ZUR ECHTZEIT UND SCHRITTWEITE INNER-
C           HALB DER RUNGE - KUTTA RECHNUNG
C   NW     ANZAHL DER WAELZKOERPER
C   TEND   ENDE DES ZU RECHNENDEN ZEITBEREICHS
C
C A: COMMON
C   /KIN/   NEUE KINEMATIKGROESSEN
C   DT     NEUE SCHRITTWEITE
C   T      ZEIT NACH ENDE DES ZEITSCHRITTS
C   DTM    IM LETZTEN ZEITSCHRITT BENUTZTE SCHRITTWEITE
C
C VERWENDETE UP: RUKU, BUFFER
C
C STAND      : 02.04.1987
C -----
C
```

```
C
C SUBROUTINE D E L T A T (NW,DTM,TEND,KFORM,IFEHL)
C CHARACTER FN1*10, FN2*10, FN3*10, FN4*10, FN5*10, FN6*10, TITEL*20
C REAL X(44,5), XALTR(44,5), XGROBR(44,5), XFEINR(44,5), XMERKR(44,5)
C REAL XK(6), XALTK(6), XGROBK(6), XFEINK(6), XMERKK(6)
C REAL XKV(44,3), XALTKV(44,3), XGROBKV(44,3), XFEINKV(44,3)
C REAL XMERKKV(44,3)
C REAL GR(5,3), GK(9,3)
C COMMON /KANAL/ KANAL1, KANAL2, KANAL3, KANAL4, KANAL5, KANAL6, KANAL7
C COMMON /ZEIT/ DT, T, IZS, IZV, IDTK
C COMMON /GRENZ/ GR, GK
C COMMON /FLAGS/ IKFIA, ITKG, IKSE
C COMMON /KIN/ X, XK, XKV
C IFEHL=0
C
```

```
C
C... KONSTANTE SCHRITTWEITE
C IF(IDTK.EQ.0) GOTO 15
C DO 16 I=1,5
C DO 16 J=1,NW
C 16 XALTR(J,I)=X(J,I)
C IF(ITKG.LT.2) THEN
C DO 17 I=1,6
C 17 XALTK(I)=XK(I)
C DO 18 I=1,3
C DO 18 J=1,NW
C 18 XALTKV(J,I)=XKV(J,I)
C END IF
C CALL RUKU(NW,XALTR,XALTK,XALTKV,XFEINR,XFEINK,XFEINKV,DT)
C DO 13 I=1,5
C DO 13 J=1,NW
C 13 X(J,I)=XFEINR(J,I)
C IF(ITKG.LT.2) THEN
C DO 14 I=1,6
C 14 XK(I)=XFEINK(I)
C DO 19 I=1,3
C DO 19 J=1,NW
C 19 XKV(J,I)=XFEINKV(J,I)
C END IF
C T=T+DT
C DTM=DT
C RETURN
C
```

```
C... AUTOMATISCHE SCHRITTWEITENSTEUERUNG
15 CONTINUE
DO 1 I=1,5
DO 1 J=1,NW
1 XALTR(J,I)=X(J,I)
IF(ITKG.LT.2) THEN
DO 10 I=1,6
10 XALTK(I)=XK(I)
DO 20 I=1,3
DO 20 J=1,NW
20 XALTKV(J,I)=XKV(J,I)
END IF
2 CONTINUE
CALL RUKU(NW,XALTR,XALTK,XALTKV,XGROBR,XGROBK,XGROBKV,2.*DT)
CALL RUKU(NW,XALTR,XALTK,XALTKV,XMERKR,XMERKK,XMERKKV,DT)
CALL RUKU(NW,XMERKR,XMERKK,XMERKKV,XFEINR,XFEINK,XFEINKV,DT)
C
IFLAG=1
DO 3 I=1,5
DO 3 J=1,NW
DEL=(XFEINR(J,I)-XGROBR(J,I))/15.
X(J,I)=XFEINR(J,I)+DEL
IF(ABS(DEL).GT.GR(I,2)) THEN
IFLAG=0
ENDIF
IF(ABS(DEL).GT.GR(I,1)) THEN
GR(I,3)=GR(I,3)+1.
II=I+10
GOTO 11
END IF
3 CONTINUE
IF(ITKG.LT.2) THEN
DO 12 I=1,6
DEL=(XFEINK(I)-XGROBK(I))/15.
XK(I)=XFEINK(I)+DEL
IF(ABS(DEL).GT.GK(I,2)) THEN
IFLAG=0
ENDIF
IF(ABS(DEL).GT.GK(I,1)) THEN
GK(I,3)=GK(I,3)+1.
II=I+20
GOTO 11
END IF
12 CONTINUE
DO 21 I=1,3
DO 21 J=1,NW
DEL=(XFEINKV(J,I)-XGROBKV(J,I))/15.
XKV(J,I)=XFEINKV(J,I)+DEL
21 CONTINUE
END IF
DTM=2.*DT
T=T+DTM
IF(IFLAG.EQ.1) DT=1.25*DT
IF((T+2.*DT).GT.TEND) DT=(TEND-T)/2.
RETURN
C
11 DT=0.49*DT
IF(KFORM.EQ.0) THEN
WRITE(KANAL2,3335) IZS,T,DT,II
ELSE
WRITE(KANAL2,3336) IZS,DT,II
ENDIF
CALL BUFFER(KANAL2, FN2)
IZV=IZV+1
IF(DT.LT.1.E-10) THEN
WRITE(KANAL2,3337)
WRITE(KANAL7,3337)
IFEHL=1
```

```
        RETURN
      ENDIF
      GOTO 2
C
3335 FORMAT(1X,'I=',I7,'          ',10X,' T=',1PE10.4,' **DT=',
&1PE10.4,I3)
3336 FORMAT(I7,'**',1PE10.4,I3)
3337 FORMAT(////,1X,'***** FEHLER ***** : DT ZU KLEIN !',////)
C
      END
```

```
C -----
C
C RUKU      BESTIMMT AUS DEN MOMENTANEN KINEMATIKGROESSEN DIE WERTE
C ===== FUER DEN FOLGENDEN ZEITSCHRITT MIT HILFE DES RUNGE-KUTTA
C           VERFAHRENS
C
C E: COMMON
C   /KIN/   MOMENTANE KINEMATIKGROESSEN
C   XO      WK-KINEMATIKGROESSEN VOR DEM AKTUELLEN ZEITSCHRITT
C   XOK      KF-KINEMATIKGROESSEN VOR DEM AKTUELLEN ZEITSCHRITT
C   XOKV     KF-VERFORMUNGSGROESSEN VOR DEM AKTUELLEN ZEITSCHRITT
C   X1       WK-KINEMATIKGROESSEN NACH DEM AKTUELLEN ZEITSCHRITT
C   X1K      KF-KINEMATIKGROESSEN NACH DEM AKTUELLEN ZEITSCHRITT
C   X1KV     KF-VERFORMUNGSGROESSEN NACH DEM AKTUELLEN ZEITSCHRITT
C   NW      ANZAHL DER WAELZKOERPER
C   DT      LAENGE EINES ZEITSCHRITTES
C
C A: COMMON
C   /KIN/   NEUE KINEMATIKGROESSEN
C
C VERWENDETE UP: KRAFT, DGLR, DGLK, GLKV
C
C STAND      : 02.03.1987
C -----
C
C SUBROUTINE R U K U (NW,XO,XOK,XOKV,X1,X1K,X1KV,DT)
C REAL FXSI(44),FETA(44),PR(44),FM(8)
C REAL X(44,5),XO(44,5),X1(44,5)
C REAL XK(6),XOK(6),X1K(6)
C REAL XKV(44,3),XOKV(44,3),X1KV(44,3)
C REAL KX(5,44,4),KKX(6,4),KKVX(4,44,4)
C REAL FR(5),FK(6),FKV(3)
C COMMON /KIN/X,XK,XKV
C COMMON /KRIT/ FXSI,FETA,FXSIBD,FETABD,PR,PRBD,FM,K
C COMMON /FLAGS/ IKFIA,ITKG,IKSE
C
C DO 2 I=1,5
C DO 2 J=1,NW
2 X(J,I)=XO(J,I)
  IF(ITKG.LT.2) THEN
    DO 3 I=1,6
3     XK(I)=XOK(I)
      DO 7 I=1,3
      DO 7 J=1,NW
7     XKV(J,I)=XOKV(J,I)
  END IF
C
C 5 CONTINUE
C DO 1 K=1,4
C CALL KRAFT(K)
C
C DO 4 J=1,NW
C CALL DGLR(FR,J)
C
C DO 4 I=1,5
C KX(I,J,K)=FR(I)*DT
C IF((K.EQ.1).OR.(K.EQ.2)) X(J,I)=XO(J,I)+0.5*KX(I,J,K)
C IF(K.EQ.3) X(J,I)=XO(J,I)+KX(I,J,K)
C IF(K.EQ.4) X1(J,I)=XO(J,I)+(KX(I,J,1)+2.*KX(I,J,2)+
C &          2.*KX(I,J,3)+KX(I,J,4))/6.
C 4 CONTINUE
C IF(ITKG.LT.2) THEN
C   IF(K.EQ.4) THEN
C     DO 8 J=1,NW
C     DO 8 I=1,3
C     X1KV(J,I)=XKV(J,I)
C 8 CONTINUE
```

```
      ENDIF
C
      CALL DGLK(FK)
      DO 6 I=1,6
      KKX(I,K)=FK(I)*DT
      IF((K.EQ.1).OR.(K.EQ.2)) XK(I)=XOK(I)+0.5*KKX(I,K)
      IF(K.EQ.3) XK(I)=XOK(I)+KKX(I,K)
      IF(K.EQ.4) X1K(I)=XOK(I)+(KKX(I,1)+2.*KKX(I,2)+2.*KKX(I,3)+
&                KKX(I,4))/6
6      CONTINUE
      END IF
1 CONTINUE
C
      RETURN
      END
```

```
C -----
C DGLR      STELLT DIE DIFFERENTIALGLEICHUNGEN FUER DIE RUNGE-KUTTA
C ===      RECHNUNG ZUR VERFUEGUNG
C
C E: J      WAELZKOERPERNUMMER
C
C A: F      ZEITLICHE ABLEITUNGEN DER WK-KINEMATIKGROESSEN
C
C VERWENDETE UP: KEINE
C
C STAND      : 02.03.1987
C -----
C
C SUBROUTINE D G L R (F,J)
C IMPLICIT REAL (M)
C REAL F(5)
C REAL RP(44),BP(44),AP(44),R(44),B(44),WR(44),WT(44),D(44)
C REAL FRESR(44),FRESB(44),MRES(44)
C COMMON /GEO/ PI,PI2,PIH,RI,RAC,RKTC,RKIC,RKAC,RTC,RWC,BWC,RSOC,
C &EAC,BEAC,EIC,BEIC,OMSOC,OMSOPC,BEAPC,MW,MK,TETA,TETAK,NW,GAMA,
C &BEIPC,EIA,GAMI,DELA,DELI,REB,REBRC,BBC,BLAST1,BLAST2,
C &GFIW,GFAW,GFWK,GFIBK,GFABK,GFW,GFWKK,RKNC,RKRC
C COMMON /FLAGS/ IKFIA,ITKG,IKSE
C COMMON /KIN/ RP,BP,AP,R,B,EP,BEP,AKP,EK,BEK,AK,WR,WT,D
C COMMON /RESU/ FRESR,FRESB,MRES,FRESKE,FRESKB,MRESK
C
C F(1)=FRESR(J)/MW+R(J)*BP(J)**2+2.*OMSOC*R(J)*BP(J)+OMSOC**2*
C &(RSOC*COS(B(J))+R(J))-OMSOPC*RSOC*SIN(B(J))
C
C F(2)=(FRESB(J)/MW-2.*RP(J)*BP(J)-2.*OMSOC*RP(J)-OMSOC**2*
C &RSOC*SIN(B(J))-OMSOPC*(R(J)+RSOC*COS(B(J))))/R(J)
C
C F(3)=MRES(J)/TETA-TETA*OMSOPC
C
C F(4)=RP(J)
C
C F(5)=BP(J)
C
C RETURN
C END
```

```
C -----
C DGLK      STELLT DIE DIFFERENTIALGLEICHUNGEN FUER DIE RUNGE-KUTTA
C ===      RECHNUNG ZUR VERFUEGUNG
C
C E
C
C A: F      ZEITLICHE ABLEITUNGEN DER KAEFIG-KINEMATIKGROESSEN
C
C VERWENDETE UP: KEINE
C
C STAND      : 02.03.1987
C -----
C
C SUBROUTINE D G L K (F)
C IMPLICIT REAL (M)
C REAL FXSI(44),FETA(44),PR(44),FM(8)
C REAL F(6)
C REAL RP(44),BP(44),AP(44),R(44),B(44),WR(44),WT(44),D(44)
C REAL FRESR(44),FRESB(44),MRES(44)
C COMMON /GEO/ PI,PI2,PIH,RIC,RAC,RKTC,RKIC,RKAC,RTC,RWC,BWC,RSOC,
C &EAC,BEAC,EIC,BEIC,OMSOC,OMSOPC,BEAPC,MW,MK,TETAW,TETAK,NW,GAMA,
C &BEIPC,EIA,GAMI,DELA,DELI,RBKC,RBRC,BBC,BLAST1,BLAST2,
C &GFIW,GFAW,GFWK,GFIBK,GFABK,GFW,GFWKK,RKNC,RKRC
C COMMON /FLAGS/ IKFIA,ITKG,IKSE
C COMMON /KIN/ RP,BP,AP,R,B,EP,BEP,AKP,EK,BEK,AK,WR,WT,D
C COMMON /RESU/ FRESR,FRESB,MRES,FRESKE,FRESKB,MRESK
C COMMON /KRIT/ FXSI,FETA,FXSIBD,FETABD,PR,PRBD,FM,K
C
C F(1)=FRESKE/MK+OMSOC**2*(EK+RSOC*COS(BEK))-
C &OMSOPC*RSOC*SIN(BEK)+EK*BEP**2+2.*OMSOC*EK*BEP
C
C IF(EK.EQ.0.) THEN
C   F(2)=0.
C ELSE
C   F(2)=(FRESKB/MK-OMSOC**2*RSOC*SIN(BEK)-
C & OMSOPC*(EK+RSOC*COS(BEK))-2.*EP*BEP-2.*OMSOC*EP)/EK
C   ENDIF
C
C F(3)=MRESK/TETAK-OMSOPC
C
C F(4)=EP
C
C F(5)=BEP
C
C F(6)=AKP
C
C RETURN
C END
```



```
FRESKE=FRESKE+FKE
FRESKB=FRESKB+FKB
MRESK=MRESK+MKF
END IF
IF(ITKG.EQ.2) THEN
  CALL SPLTVR(J,FR,FB,M,FNEXTR,FNEXTB,MNEXT)
  IF(J.EQ.NW) THEN
    J1=1
  ELSE
    J1=J+1
  ENDIF
  FRESR(J1)=FRESR(J1)+FNEXTR
  FRESB(J1)=FRESB(J1)+FNEXTB
  MRES(J1)=MRES(J1)+MNEXT
  FRESR(J)=FRESR(J)+FR
  FRESB(J)=FRESB(J)+FB
  MRES(J)=MRES(J)+M
END IF
1 CONTINUE
IF(ITKG.EQ.2) THEN
  FRESR(1)=FRESR(1)+FNEXTR
  FRESB(1)=FRESB(1)+FNEXTB
  MRES(1)=MRES(1)+MNEXT
END IF
IF(IKFIA.EQ.1) CALL SPLTIB(FKE,FKB,MKF)
IF(IKFIA.EQ.2) CALL SPLTAB(FKE,FKB,MKF)
IF(IKFIA.GT.0) THEN
  FRESKE=FRESKE+FKE
  FRESKB=FRESKB+FKB
  MRESK=MRESK+MKF
END IF
IF(IKSE.EQ.1.AND.K.EQ.4) CALL DEFORM
RETURN
END
```



```
C -----
C
C SPLTKK  BESTIMMT DIE GEOMETRISCHEN UND KINEMATISCHEN SPALT-
C ===== KENNGROESSEN UND KRAEFTE ZWISCHEN WAE LZKOERPER UND
C          KAEFIG MIT KREISFOERMIGER TASCHENKONTUR
C
C E: /KVER/ KRAEFTE UND EINFLUSSZAHLEN FUER KAEFIG-
C          VERFORMUNG
C          /GEO/  LAGER - GEOMETRIEGROESSEN
C
C A: FJR12  RADIALKRAFT AUF WAE LZKOERPER J
C     FJB12  TANGENTIALKRAFT AUF WAE LZKOERPER J
C     MJ12   MOMENT AUF WAE LZKOERPER J
C     FKJR   RADIALKRAFT AUF KAEFIGTASCHE J
C     FKJB   TANGENTIALKRAFT AUF KAEFIGTASCHE J
C     MKJ    MOMENT AUF KAEFIGTASCHE J
C     FJR11  RADIALKRAFT AUF DEN WAE LZKOERPER J-1
C     FJB11  TANGENTIALKRAFT AUF DEN WAE LZKOERPER J-1
C     MJ11   MOMENT AUF DEN WAE LZKOERPER J-1
C     /RESU/ AEUSSERE KRAEFTE AUF WAE LZKOERPER UND KAEFIG
C     /KVER/ KRAEFTE UND EINFLUSSZAHLEN FUER KAEFIG-
C          VERFORMUNG
C
C VERWENDETE UP: REAL FUNCTION PROJEC
C                DRUCK, KARPOL
C
C STAND          : 10.03.1987
C -----
C
C SUBROUTINE  S P L T K K (J,FJR12,FJB12,MJ12,FKE,FKB,MKJ,
C &FJR11,FJB11,MJ11)
C IMPLICIT REAL (M)
C INTEGER FLAGTL
C REAL RP(44),BP(44),AP(44),R(44),B(44),WR(44),WT(44),D(44)
C REAL RKP(44),BKP(44)
C REAL FWR(44),FWT(44),MD(44)
C REAL UR(408,3),UT(408,3),UM(408,3)
C REAL FXSI(44),FETA(44),PR(44),FM(8)
C REAL FKE1(2),FKB1(2),MKJ1(2),FJR1(2),FJB1(2),MJ1(2)
C REAL RK(44),BK(44),DK(44)
C COMMON /GEO/ PI,PI2,PIH,RIC,RAC,RKTC,RKIC,RKAC,RTC,RWC,BWC,RSOC,
C &EAC,BEAC,EIC,BEIC,OMSOC,OMSOPC,BEAPC,MW,MK,TETA W,TETAK,NW,GAMA,
C &BEIPC,EIA,GAMI,DELA,DELI,RBKC,RBRC,BBC,BLAST1,BLAST2,
C &GFIW,GFAW,GFWK,GFIBK,GFABK,GFW,GFWKK,RKNC,RKRC
C COMMON /FLAGS/ IKFIA,ITKG,IKSE
C COMMON /KIN/  RP,BP,AP,R,B,EP,BEP,AKP,EK,BEK,AK,WR,WT,D
C COMMON /KRIT/ FXSI,FETA,FXSIBD,FETABD,PR,PRBD,FM,K
C COMMON /KVER/ FWR,FWT,MD,NKN,UR,UT,UM
C
C RK(J)=RKNC+WR(J)
C BK(J)=AK+FLOAT(J-1)*PI2/NW-ATAN(WT(J)/RKNC)
C DK(J)=D(J)
C BKP(J)=AKP
C RKP(J)=0.
C
C TRIGONOMETRISCHE FUNKTIONEN VON B(J),BEK,BK(J)
C SBEK=SIN(BEK)
C CBEK=COS(BEK)
C EKX=EK*SBEK
C EKY=EK*CBEK
C EKPX=EP*SBEK+EK*BEP*CBEK
C EKPY=EP*CBEK-EK*BEP*SBEK
C SBKJ=SIN(BK(J))
C CBKJ=COS(BK(J))
C RKX=RK(J)*SBKJ
C RKY=RK(J)*CBKJ
C RK2PX=RK(J)*(AK2P*CBKJ-AKP**2*SBKJ)
C RK2PY=RK(J)*(-AK2P*SBKJ-AKP**2*CBKJ)
```

```
C
  TNW=PI/NW
C...  ISS=1 : LINKE STEGSEITE, ISS=2 : RECHTE STEGSEITE
      DO 1 ISS=1,2
C...  VORZEICHEN =(-) BEI LINKER STEGSEITE, =(+) BEI RECHTER STEGSEITE
      IVORZ=2*ISS-3
      JI=ISS-2+J
      IF(JI.EQ.0) JI=NW
      BKT=BK(J)-DK(J)+IVORZ*TNW
      SBKT=SIN(BKT)
      CBKT=COS(BKT)
      SBJ=SIN(B(JI))
      CBJ=COS(B(JI))
C...  LAGEVEKTOR DES KAEFIGSTEGMITTELPUNKTES BZGL. OKJ
      BKN=BK(J)-DK(J)
      RKNX=RKNC*SIN(BKN)
      RKNY=RKNC*COS(BKN)
C...  LAGEVEKTOR DES WAE LZKOERPERMITTELPUNKTES (J-1) BZW. (J)
      MWX=R(JI)*SBJ
      MWY=R(JI)*CBJ
      OKOKX=RKX-RKNX
      OKOKY=RKY-RKNY
C...  LAGE DER KAEFIGTASCHE BZGL. KRUEMMUNGSMITTELPUNKT OKJ
C...  RTO, BTO
      RTOX=EKX+OKOKX+RKTC*SBKT
      RTOY=EKY+OKOKY+RKTC*CBKT
      CALL KARPOL(RTOX,RTOY,RTO,BTO)
C...  VERLAGERUNGVEKTOR TASCHE J1 -> WAE LZKOERPER J-1
      MTMWX=MWX-RTOX
      MTMWY=MWY-RTOY
      MTMWB=SQRT(MTMWX**2+MTMWY**2)
      RMTMWX=MTMWX/MTMWB
      RMTMWY=MTMWY/MTMWB
C...  ABFRAGE AUF ZENTRISCHE LAGE
      IF(MTMWB.EQ.0.) THEN
          FKE1(ISS)=0.
          FKB1(ISS)=0.
          MKJ1(ISS)=0.
          FJR1(ISS)=0.
          FJB1(ISS)=0.
          MJ1(ISS)=0.
          GOTO 1
      ENDIF
C
C...  TASCHENLAGE ?
C...  1. BEDINGUNG : PROJEKTION VON MTMW AUF SENKRECHTE ZU RKT1,2 (IN
C...  POSITIVER BETA-RICHTUNG) IST = (-1)*IVORZ
      P=PROJEK(MTMWX,MTMWY,CBKT,-SBKT,0)
      IF(IFIX(SIGN(1.,P)).EQ.(-IVORZ)) THEN
C...  2. BEDINGUNG : RKAC > RB > RKIC
C...  BERUEHRKREISRADIUS RB
      RB=SQRT(RKTC**2+RTC**2+2.*RKTC*RTC*(SBKT*RMTMWX+
&  CBKT*RMTMWY))
C...  FLAG TASCHENLAGE ( 1 = TASCHENLAGE, 0 = KIPPEN )
      IF(RB.GE.RKIC.AND.RB.LE.RKAC) THEN
          FLAGTL=1
      ELSE
          FLAGTL=0
      ENDIF
      ELSE
          FLAGTL=0
      ENDIF
C
C...  GESCHWINDIGKEIT DES WAE LZKOERPERMITTELPUNKTES
      OMWPX=RP(JI)*SBJ+R(JI)*BP(JI)*CBJ
      OMWPY=RP(JI)*CBJ-R(JI)*BP(JI)*SBJ
C...  SCHMIERSPALTKENNGROESSEN UND -KRAEFTE
C...  GESCHWINDIGKEIT OKOKJP DES UNVERFORMTEN KAEFIGMITTELPUNKTES OKJ
```

```
C... GEGENUEBER DEM KAEFIGSCHWERPUNKT OK
      OKOKPX=RKP(J)*SBKJ+(RKY-RKNY)*BKP(J)
      OKOKPY=RKP(J)*CBKJ+(-RKX+RKNX)*BKP(J)
C... GESCHWINDIGKEIT RKTP DES TASCHENMITTELPUNKTES GEGENUEBER OKJ
      RKTPX=RKTC*BKP(J)*CBKT
      RKTPY=-RKTC*BKP(J)*SBKT
      IF(FLAGTL.EQ.1) THEN
C...   TASCHENLAGE !
      RTOPX=EKPX+OKOKPX+RKTPX
      RTOPY=EKPY+OKOKPY+RKTPY
      MTMWPX=OMWPX-RTOPX
      MTMWPY=OMWPY-RTOPY
      MTMWBP=PROJEK(MTMWPX,MTMWPY,RMTMWX,RMTMWY,0)
      OMEX=MTMWPX/MTMWB-MTMWBP/MTMWB**2*MTMWX
      OMEY=MTMWPY/MTMWB-MTMWBP/MTMWB**2*MTMWY
      OAPX=RTOPX+RTC*OMEX
      OAPY=RTOPY+RTC*OMEY
      OBPX=OMWPX+RWC*OMEX
      OBPY=OMWPY+RWC*OMEY
      VM=-MTMWBP
      HO=RTC-RWC-MTMWB
C...   RICHTUNGSCOSINUS DER POSITIVEN U-RICHTUNGDES LOKALEN KOS
      RLUX=-RMTMWY
      RLUY=RMTMWX
C...   RICHTUNGSCOSINUS DER POSITIVEN Y-RICHTUNG DES LOKALEN KOS
      RLYX=-RLUY
      RLYY=RLUX
      OKAX=RTOX-RTC*RLYX-EKX
      OKAY=RTOY-RTC*RLYY-EKY
      U1=PROJEK(OAPX,OAPY,RLUX,RLUY,0)
      U2=PROJEK(OBPX,OBPY,RLUX,RLUY,0)-RWC*AP(JI)
      CALL DRUCK(1,GFWK,BWC,HO,VM,U1,U2,FY1,FU1,FY2,FU2)
      MSAX=-EKX-RKX+RTOX-RTC*RLYX
      MSAY=-EKY-RKY+RTOY-RTC*RLYY
      ELSE
C...   KIPPEN !
      RWKX=MWX-EKX-OKOKX
      RWKY=MWY-EKY-OKOKY
      RWKB=SQRT(RWKX**2+RWKY**2)
C...   KIPPEN UM INNERE ODER AEUSSERE KAEFIGSTEGECKE ?
      IF(RWKB.GT.RKTC) THEN
          BD=BKN+IVORZ*DELA/2.
          RSEX=RKAC*SIN(BD)
          RSEY=RKAC*COS(BD)
      ELSE
          BD=BKN+IVORZ*DELI/2.
          RSEX=RKIC*SIN(BD)
          RSEY=RKIC*COS(BD)
      ENDIF
      RSEPX=BKP(J)*RSEY
      RSEPY=-BKP(J)*RSEX
      OAPX=EKPX+OKOKPX+RSEPX
      OAPY=EKPY+OKOKPY+RSEPY
      MWSEX=EKX+OKOKX+RSEX-MWX
      MWSEY=EKY+OKOKY+RSEY-MWY
      MWSEB=SQRT(MWSEX**2+MWSEY**2)
      RMWSEX=MWSEX/MWSEB
      RMWSEY=MWSEY/MWSEB
      MWSEPX=OAPX-OMWPX
      MWSEPY=OAPY-OMWPY
      MWSEBP=PROJEK(MWSEPX,MWSEPY,RMWSEX,RMWSEY,0)
      OBPX=OMWPX+RWC*(MWSEPX/MWSEB-MWSEBP/MWSEB**2*MWSEX)
      OBPY=OMWPY+RWC*(MWSEPY/MWSEB-MWSEBP/MWSEB**2*MWSEY)
C...   RICHTUNGSCOSINUS DER POSITIVEN U-RICHTUNG DES LOKALEN KOS
      RLUX=-RMWSEY
      RLUY=RMWSEX
C...   RICHTUNGSCOSINUS DER POSITIVEN Y-RICHTUNG DES LOKALEN KOS
      RLYX=-RLUY
```

```

      RLYY=RLUX
      HO=MWSEB-RWC
      OKAX=OKOKX+RSEX
      OKAY=OKOKY+RSEY
      VM=MWSEBP
      U1=PROJEK(OAPX,OAPY,RLUX,RLUY,0)
      U2=PROJEK(OBPX,OBPY,RLUX,RLUY,0)-RWC*AP(JI)
      CALL DRUCK(1,GFWKK,BWC,HO,VM,U1,U2,FY1,FU1,FY2,FU2)
      MSAX=RSEX-RKNX
      MSAY=RSEY-RKNY
ENDIF
C
C...  SCHMIERSPALTKRAEFTE AUF KAEFIG MERKEN FUER AUSGABE KANAL 6,7
      IF(J.EQ.1.AND.K.EQ.4) THEN
        IF(ISS.EQ.1) THEN
          FM(3)=FU1
          FM(7)=FY1
        ELSE
          FM(4)=FU1
          FM(8)=FY1
        ENDIF
      ENDIF
C
C...  KAEFIG-VERFORMUNGSKRAEFTE AM KNOTEN J
      F1X=FY1*RLYX+FU1*RLUX
      F1Y=FY1*RLYY+FU1*RLUY
      FWT(J)=PROJEK(F1X,F1Y,-CBKJ,SBKJ,0)+FWT(J)
      FWR(J)=PROJEK(F1X,F1Y,SBKJ,CBKJ,0)+FWR(J)
C...  MOMENT UM KAEFIGSTEG J
      HY=PROJEK(MSAX,MSAY,RLUX,RLUY,0)
      HU=PROJEK(MSAX,MSAY,RLYX,RLYY,0)
      MD(J)=HY*FY1-FU1*HU+MD(J)
C...  KRAFT AUF KAEFIGSCHWERPUNKT IN EK- UND BEK-RICHTUNG
      FKE1(ISS)=PROJEK(F1X,F1Y,EKX,EKY,1)
      FKB1(ISS)=PROJEK(F1X,F1Y,EKY,-EKX,1)
C...  MOMENT UM KAEFIGSCHWERPUNKT
      OKAB=SQRT(OKAX**2+OKAY**2)
      MKJ1(ISS)=OKAB*PROJEK(F1X,F1Y,OKAY/OKAB,-OKAX/OKAB,0)
C...  KRAFT AUF WAELZKOERPER IN R- UND B-RICHTUNG
      FJR1(ISS)=PROJEK(-F1X,-F1Y,MWX,MWY,1)
      FJB1(ISS)=PROJEK(-F1X,-F1Y,MWY,-MWX,1)
C...  MOMENT UM WAELZKOERPER-SCHWERPUNKT
      MJ1(ISS)=-RWC*FU2
C      WRITE(*,1000) J,ISS,FLAGTL,FY1
C      WRITE(*,2000)HO,VM,U1,U2,FY1,FU1
      2000 FORMAT(6E12.6)
      1000 FORMAT(3I3,E12.6)
      1 CONTINUE
C
      FKE=FKE1(1)+FKE1(2)
      FKB=FKB1(1)+FKB1(2)
      MKJ=MKJ1(1)+MKJ1(2)
      FJR12=FJR1(2)
      FJB12=FJB1(2)
      MJ12=MJ1(2)
      FJR11=FJR1(1)
      FJB11=FJB1(1)
      MJ11=MJ1(1)
      RETURN
      END
```

```

C -----
C
C SPLTKG   BESTIMMT DIE GEOMETRISCHEN UND KINEMATISCHEN SPALT-
C ===== KENNGROESSEN UND KRAEFTE ZWISCHEN WAELZKOERPER UND
C           KAEFIG MIT GERADER, PARALELL ZUM RADIALSTRAHL VER-
C           LAUFENDER TASCHENKONTUR
C
C E: J      WAELZKOERPERNUMMER
C          /GEO/  LAGER - GEOMETRIEGROESSEN
C          /KIN/  KINEMATIKGROESSEN VON WAELZKOERPERN UND
C                KAEFIG, KAEFIGVERFORMUNGEN
C
C A: FJR12  RADIALKRAFT AUF WAELZKOERPER J
C          FJB12 TANGENTIALKRAFT AUF WAELZKOERPER J
C          MJ12  MOMENT AUF WAELZKOERPER J
C          FKJR  RADIALKRAFT AUF KAEFIGTASCHE J
C          FKJB  TANGENTIALKRAFT AUF KAEFIGTASCHE J
C          MKJ   MOMENT AUF KAEFIGTASCHE J
C          FJR11 RADIALKRAFT AUF DEN WAELZKOERPER J-1
C          FJB11 TANGENTIALKRAFT AUF DEN WAELZKOERPER J-1
C          MJ11  MOMENT AUF DEN WAELZKOERPER J-1
C          /RESU/ AEUSSERE KRAEFTE AUF WAELZKOERPER UND KAEFIG
C          /KVER/ KRAEFTE UND EINFLUSSZAHLEN FUER KAEFIG-
C                VERFORMUNG
C
C VERWENDETE UP: REAL FUNCTION PROJEC, DRUCK
C
C STAND      : 15.04.1987
C -----
C
C SUBROUTINE S P L T K G (J,FJR12,FJB12,MJ12,FKE,FKB,MKJ,
C &FJR11,FJB11,MJ11)
C IMPLICIT REAL (M)
C INTEGER FLAGTL
C REAL RP(44),BP(44),AP(44),R(44),B(44),WR(44),WT(44),D(44)
C REAL RKP(44),BKP(44)
C REAL FWR(44),FWT(44),MD(44)
C REAL UR(408,3),UT(408,3),UM(408,3)
C REAL FXSI(44),FETA(44),PR(44),FM(8)
C REAL FKE1(2),FKB1(2),MKJ1(2),FJR1(2),FJB1(2),MJ1(2)
C REAL RK(44),BK(44),DK(44)
C COMMON /GEO/ PI,PI2,PIH,RIC,RAC,RKTC,RKIC,RKAC,RTC,RWC,BWC,RSOC,
C &EAC,BEAC,EIC,BEIC,OMSOC,OMSOPC,BEAPC,MW,MK,TETAW,TETAK,NW,GAMA,
C &BEIPC,EIA,GAMI,DELA,DELI,RBKC,RBRC,BBC,BLAST1,BLAST2,
C &GFIW,GFAW,GFWK,GFIBK,GFABK,GFW,GFWKK,RKNC,RKRC
C COMMON /FLAGS/ IKFIA,ITKG,IKSE
C COMMON /KIN/  RP,BP,AP,R,B,EP,BEP,AKP,EK,BEK,AK,WR,WT,D
C COMMON /KRIT/ FXSI,FETA,FXSIBD,FETABD,PR,PRBD,FM,K
C COMMON /KVER/ FWR,FWT,MD,NKN,UR,UT,UM
C
C RK(J)=RKNC+WR(J)
C BK(J)=AK+FLOAT(J-1)*PI2/NW-ATAN(WT(J)/RKNC)
C DK(J)=D(J)
C BKP(J)=AKP
C RKP(J)=0.
C... TRIGONOMETRISCHE FUNKTIONEN VON B(J),BEK,BK(J)
C SBEK=SIN(BEK)
C CBEK=COS(BEK)
C EKX=EK*SBEK
C EKY=EK*CBEK
C EKPX=EP*SBEK+EK*BEP*CBEK
C EKPX=EP*CBEK-EK*BEP*SBEK
C SBKJ=SIN(BK(J))
C CBKJ=COS(BK(J))
C RKX=RK(J)*SBKJ
C RKY=RK(J)*CBKJ
C RK2PX=RK(J)*(AK2P*CBKJ-AKP**2*SBKJ)

```

```
RK2PY=RK(J)*(-AK2P*SBKJ-AKP**2*CBKJ)
C
  TNW=PI/NW
C...  ISS=1 : LINKE STEGSEITE, ISS=2 : RECHTE STEGSEITE
      DO 1 ISS=1,2
C...  VORZEICHEN =(-) BEI LINKER STEGSEITE, =(+) BEI RECHTER STEGSEITE
      IVORZ=2*ISS-3
      JI=ISS-2+J
      IF(JI.EQ.0) JI=NW
      BKN=BK(J)-DK(J)
      BKT=BKN+IVORZ*TNW
      SBKT=SIN(BKT)
      CBKT=COS(BKT)
      SBJ=SIN(B(JI))
      CBJ=COS(B(JI))
C...  LAGEVEKTOR DES KAEFIGSTEGMITTELPUNKTES BZGL. OKJ
      RKNX=RKNC*SIN(BKN)
      RKNY=RKNC*COS(BKN)
C...  LAGEVEKTOR DES WAE LZKOERPERMITTELPUNKTES (J-1) BZW. (J)
      OMWX=R(JI)*SBJ
      OMWY=R(JI)*CBJ
C...  VEKTOR VOM MITTELPUNKT DES UNVERFORMTEN KAEFIGS ZUM FIKTIVEN,
C...  TASCHENBEZOGENEN KAEFIGMITTELPUNKT OKJ
      OKOKX=RKX-RKNX
      OKOKY=RKY-RKNY
C
C...  SCHMIERSPALTKENNGROESSEN UND -KRAEFTE
C...  GESCHWINDIGKEIT DES WAE LZKOERPERMITTELPUNKTES
      OMWPX=RP(JI)*SBJ+R(JI)*BP(JI)*CBJ
      OMWPY=RP(JI)*CBJ-R(JI)*BP(JI)*SBJ
C...  GESCHWINDIGKEIT OKOKJP DES UNVERFORMTEN KAEFIGMITTELPUNKTES OKJ
C...  GEGENUEBER DEM KAEFIGSCHWERPUNKT OK
      OKOKPX=RKP(J)*SBKJ+(RKY-RKNY)*BKP(J)
      OKOKPY=RKP(J)*CBKJ+(-RKX+RKNX)*BKP(J)
C...  VEKTOR VOM FIKTIVEN KAEFIGMITTELPUNKT OKJ ZUR INNEREN,
C...  AKTUELLEN STEGECKE
      BD=BKN+IVORZ*DELI/2.
      OKESIX=RKIC*SIN(BD)
      OKESIY=RKIC*COS(BD)
C...  ABLEITUNG
      OKESPX=RKIC*BKP(J)*COS(BD)
      OKESPY=-RKIC*BKP(J)*SIN(BD)
C...  VEKTOR INNERE STEGECKE ZUM WAE LZKOERPERMITTELPUNKT
      ESIMWX=OMWX-OKESIX-OKOKX-EKX
      ESIMWY=OMWY-OKESIY-OKOKY-EKY
C...  ABLEITUNG
      ESMWPX=OMWPX-OKESPX-OKOKPX-EKPY
      ESMWPY=OMWPY-OKESPY-OKOKPY-EKPY
C...  ABSTAND INNERE STEGECKE ZUM BERUEHRPUNKT A DES STEGES
      ESIAB=PROJEK(ESIMWX,ESIMWY,SBKT,CBKT,0)
C...  ABLEITUNG
      ESIABP=SBKT*(ESMWPX-ESIMWY*BKP(J))+CBKT*(ESIMWX*BKP(J)+ESMWPY)
C...  VEKTOR INNERE STEGECKE ZUM BERUEHRPUNKT A DES STEGES
      ESIAX=ESIAB*SBKT
      ESIAY=ESIAB*CBKT
C...  ABLEITUNG
      ESIAPX=ESIABP*SBKT+ESIAB*BKP(J)*CBKT
      ESIAPY=ESIABP*CBKT-ESIAB*BKP(J)*SBKT
C...  ORTSVEKTOR DES PUNKTES A
      OAX=EKX+OKOKX+OKESIX+ESIAX
      OAY=EKY+OKOKY+OKESIY+ESIAY
C...  ABSOLUTE GESCHWINDIGKEIT DES PUNKTES A
      OAPX=EKPX+OKOKPX+OKESPX+ESIAPX
      OAPY=EKPY+OKOKPY+OKESPY+ESIAPY
C...  VEKTOR WAE LZKOERPERMITTELPUNKT ZUM PUNKT A
      MWAX=ESIAX-ESIMWX
      MWAY=ESIAY-ESIMWY
C...  ABLEITUNG
```

```
MWAPX=ESIAPX-ESMWPX
MWAPY=ESIAPY-ESMWPY
C... BETRAG
MWAB=SQRT(MWAX**2+MWAY**2)
C... VEKTOR WAELZKOERPERMITTELPUNKT ZUM PUNKT B
MWBX=RWC*MWAX/MWAB
MWBX=RWC*MWAY/MWAB
C... ORTSVEKTOR DES PUNKTES B
OBX=OMWX+MWBX
OBY=OMWY+MWBX
C... ABLEITUNG
OBPX=OMWPX
OBPY=OMWPY
C... SCHMIERSPALTHOEHE
HO=MWAB-RWC
C... ANNAEHERUNGSGESCHWINDIGKEIT
VM=-(MWAX*MWAPX+MWAY*MWAPY)/MWAB
C... RICHTUNGSCOSINUS DER POSITIVEN Y-RICHTUNG DES LOKALEN KOS
RLYX=-MWAX/MWAB
RLYY=-MWAY/MWAB
C... RICHTUNGSCOSINUS DER POSITIVEN U-RICHTUNGDES LOKALEN KOS
RLUX=RLYY
RLUY=-RLYX
U1=PROJEK(OAPX,OAPY,RLUX,RLUY,0)
U2=PROJEK(OBPX,OBPY,RLUX,RLUY,0)-RWC*AP(JI)
CALL DRUCK(1,GFWK,BWC,HO,VM,U1,U2,FY1,FU1,FY2,FU2)
MSAX=OAX-EKX-OKOKX-RKNX
MSAY=OAY-EKY-OKOKY-RKNY
C
C... SCHMIERSPALTKRAEFTE AUF KAEFIG MERKEN FUER AUSGABE KANAL 6,7
IF(J.EQ.1.AND.K.EQ.4) THEN
  IF(ISS.EQ.1) THEN
    FM(3)=FU1
    FM(7)=FY1
  ELSE
    FM(4)=FU1
    FM(8)=FY1
  ENDIF
ENDIF
C
C... KAEFIG-VERFORMUNGSKRAEFTE AM KNOTEN J
F1X=FY1*RLYX+FU1*RLUX
F1Y=FY1*RLYY+FU1*RLUY
FWT(J)=PROJEK(F1X,F1Y,-CBKJ,SBKJ,0)+FWT(J)
FWR(J)=PROJEK(F1X,F1Y,SBKJ,CBKJ,0)+FWR(J)
C... MOMENT UM KAEFIGSTEG J
HY=PROJEK(MSAX,MSAY,RLUX,RLUY,0)
HU=PROJEK(MSAX,MSAY,RLYX,RLYY,0)
MD(J)=HY*FY1-FU1*HU+MD(J)
C... KRAFT AUF KAEFIGSCHWERPUNKT IN EK- UND BEK-RICHTUNG
FKE1(ISS)=PROJEK(F1X,F1Y,EKX,EKY,1)
FKB1(ISS)=PROJEK(F1X,F1Y,EKY,-EKX,1)
C... MOMENT UM KAEFIGSCHWERPUNKT
OKAX=OKESIX+ESIAX
OKAY=OKESIY+ESIAY
OKAB=SQRT(OKAX**2+OKAY**2)
MKJ1(ISS)=OKAB*PROJEK(F1X,F1Y,OKAY/OKAB,-OKAX/OKAB,0)
C... KRAFT AUF WAELZKOERPER IN R- UND B-RICHTUNG
FJR1(ISS)=PROJEK(-F1X,-F1Y,OMWX,OMWY,1)
FJB1(ISS)=PROJEK(-F1X,-F1Y,OMWY,-OMWX,1)
C... MOMENT UM WAELZKOERPER-SCHWERPUNKT
MJ1(ISS)=-RWC*FU2
1 CONTINUE
C
FKE=FKE1(1)+FKE1(2)
FKB=FKB1(1)+FKB1(2)
MKJ=MKJ1(1)+MKJ1(2)
FJR12=FJR1(2)
```

```
FJB12=FJB1(2)
MJ12=MJ1(2)
FJR11=FJR1(1)
FJB11=FJB1(1)
MJ11=MJ1(1)
RETURN
END
```

```
C
C
C -----
C SPLTVR   BERECHNET DIE SCHMIERSPALTKRAEFTE ZWISCHEN WAE LZKOERPER J
C ===== UND WAE LZKOERPER J+1
C
C E: /KIN/   KINEMATIKGROESSEN VON WAE LZKOERPERN UND
C           KAEFIG, KAEFIGVERFORMUNGEN
C           /GEO/  LAGER - GEOMETRIEGROESSEN
C           J      WAE LZKOERPERNUMMER
C
C A: FJR    KRAFT VON WAE LZKOERPER J+1 AUF WAE LZKOERPER J IN
C           R-RICHTUNG VON WAE LZKOERPER J
C           FJB  KRAFT VON WAE LZKOERPER J+1 AUF WAE LZKOERPER J IN
C           B-RICHTUNG VON WAE LZKOERPER J
C           MJ   MOMENT VON WAE LZKOERPER J+1 AUF WAE LZKOERPER J
C           FJ1R KRAFT VON WAE LZKOERPER J AUF WAE LZKOERPER J+1 IN
C           R-RICHTUNG VON WAE LZKOERPER J+1
C           FJ1B KRAFT VON WAE LZKOERPER J AUF WAE LZKOERPER J+1 IN
C           B-RICHTUNG VON WAE LZKOERPER J+1
C           MJ1  MOMENT VON WAE LZKOERPER J AUF WAE LZKOERPER J+1
C
C VERWENDETE UP: DRUCK
C
C STAND      : 02.03.1987
C
C -----
C SUBROUTINE SPLTVR (J,FJR,FJB,MJ,FJ1R,FJ1B,MJ1)
C IMPLICIT REAL (M)
C REAL RP(44),BP(44),AP(44),R(44),B(44),WR(44),WT(44),D(44)
C REAL FXSI(44),FETA(44),PR(44),FM(8)
C COMMON /KIN/ RP,BP,AP,R,B,EP,BEP,AKP,EK,BEK,AK,WR,WT,D
C COMMON /KRIT/ FXSI,FETA,FXSIBD,FETABD,PR,PRBD,FM,K
C COMMON /GEO/ PI,PI2,PIH,RIC,RAC,RKTC,RKIC,RKAC,RTC,RWC,BWC,RSOC,
C &EAC,BEAC,EIC,BEIC,OMSOC,OMSOPC,BEAPC,MW,MK,TETA W,TETAK,NW,GAMA,
C &BEIPC,EIA,GAMI,DELA,DELI,RBKC,RBRC,BBC,BLAST1,BLAST2,
C &GFIW,GFAW,GFWK,GFIBK,GFABK,GFW,GFWKK,RKNC,RKRC
C COMMON /FLAGS/ IKFIA,ITKG,IKSE
C
C IF (J.EQ.NW) THEN
C   I=1-NW
C   DELB=PI2+B(1)-B(NW)
C ELSE
C   I=1
C   DELB=B(J+I)-B(J)
C END IF
C PJ=ATAN(1./TAN(DELB)-R(J)/R(J+I)/SIN(DELB))
C PJ1=PJ+DELB
C SINPJ=SIN(PJ)
C COSPJ=COS(PJ)
C SINPJ1=SIN(PJ1)
C COSPJ1=COS(PJ1)
C MDISTW=R(J+I)*SIN(DELB)/COSPJ
C BSPW=(RP(J)*COSPJ-R(J)*BP(J)*SINPJ-RP(J+I)*
C &COSPJ1+R(J+I)*BP(J+I)*SINPJ1)/MDISTW
C HOW=MDISTW-2.*RWC
C VMW=-RP(J)*SINPJ-R(J)*BP(J)*COSPJ+RP(J+I)*
C &SINPJ1+R(J+I)*BP(J+I)*COSPJ1
C U1W=RWC*(AP(J+I)-BSPW)
C U2W=-RWC*(AP(J)-BSPW)
C CALL DRUCK(O,GFW,BWC,HOW,VMW,U1W,U2W,FY1W,FU1W,FY2W,FU2W)
C
C FJR=-FY2W*SINPJ+FU2W*COSPJ
C FJB=-FY2W*COSPJ-FU2W*SINPJ
C MJ=-FU2W*RWC
C FJ1R=-FY1W*SINPJ1+FU1W*COSPJ1
C FJ1B=-FY1W*COSPJ1-FU1W*SINPJ1
C MJ1=FU1W*RWC
```

```
IF(K.EQ.4) THEN  
  FM(3)=FU2W  
  FM(7)=FY2W  
END IF
```

C

```
RETURN  
END
```

```
C      SPLTAB      BESTIMMT SCHMIERSPALTKRAEFTE BEI AUSSENBORDFUEHRUNG
C      =====      UNTER BERUECKSICHTIGUNG DER KAEFIGVERFORMUNGEN
C
C      /KVER/      KRAEFTE UND EINFLUSSZAHLEN FUER KAEFIG-
C                  VERFORMUNG
C      /FLAGS/     FLAGS FUER KAEFIGBAUART UND -VERFORMUNG
C      /KIN/       KINEMATIKGROESSEN VON WAE LZKOERPERN UND
C                  KAEFIG, KAEFIGVERFORMUNGEN
C      /GEO/       LAGER - GEOMETRIEGROESSEN
C      /KRIT/      EINZELKRAEFTE UND -REIBLEISTUNGEN IN DEN
C                  SCHMIERSPALTEN DES DREHENDEN LAGERRINGES
C
C      A: FKE      KRAFT AUF DEN KAEFIG IN EK-RICHTUNG
C          FKB      KRAFT AUF DEN KAEFIG IN BEK-RICHTUNG
C          MKJ      MOMENT DES KAEFIGS UM KAEFIGMITTELPUNKT
```

```
C      VERWENDETE UP : DRUCK
```

```
C      STAND          : 23.03.1987
```

```
C      -----
C
C      SUBROUTINE  S P L T A B (FKE,FKB,MKJ)
C      IMPLICIT  REAL (M)
C      INTEGER  FLAGTL
C      REAL  RP(44),BP(44),AP(44),R(44),B(44),WR(44),WT(44),D(44)
C      REAL  RKP(44),BKP(44)
C      REAL  FWR(44),FWT(44),MD(44)
C      REAL  UR(408,3),UT(408,3),UM(408,3)
C      REAL  FXSI(44),FETA(44),PR(44),FM(8)
C      REAL  FKE1(2),FKB1(2),MKJ1(2),FJR1(2),FJB1(2),MJ1(2)
C      REAL  RK(44),BK(44),DK(44)
C      COMMON /GEO/  PI,PI2,PIH,RIC,RAC,RKTC,RKIC,RKAC,RTC,RWC,BWC,RSOC,
C      &EAC,BEAC,EIC,BEIC,OMSOC,OMSOPC,BEAPC,MW,MK,TETA W,TETAK,NW,GAMA,
C      &BEIPC,EIA,GAMI,DELA,DELI,RBKC,RBRC,BBC,BLAST1,BLAST2,
C      &GFIW,GFAW,GFWK,GFIBK,GFABK,GFW,GFWKK,RKNC,RKRC
C      COMMON /FLAGS/ IKFIA,ITKG,IKSE
C      COMMON /KIN/  RP,BP,AP,R,B,EP,BEP,AKP,EK,BEK,AK,WR,WT,D
C      COMMON /KRIT/ FXSI,FETA,FXSIBD,FETABD,PR,PRBD,FM,K
C      COMMON /KVER/ FWR,FWT,MD,NKN,UR,UT,UM
```

```
C
C      FKE=0.
C      FKB=0.
C      MKJ=0.
C      TNW=PI/NW
C      EAX=EAC*SIN(BEAC)
C      EAY=EAC*COS(BEAC)
C      SBEK=SIN(BEK)
C      CBEK=COS(BEK)
C      EKX=EK*SBEK
C      EKY=EK*CBEK
C      EKPX=EP*SBEK+EK*BEP*CBEK
C      EKPX=EP*CBEK-EK*BEP*SBEK
```

```
C
C      C...  BESTIMMUNG DER SCHMIERSPALTKRAEFTE IN J KNOTEN DES KAEFIGS
C      DO 1 J=1,NW
C      RK(J)=RKNC+WR(J)
C      BK(J)=AK+FLOAT(J-1)*PI2/NW-ATAN(WT(J)/RKNC)
C      DK(J)=D(J)
C      BKP(J)=AKP
C      RKP(J)=0.
C      C...  TRIGONOMETRISCHE FUNKTIONEN VON B(J), BK(J)
C      SBKJ=SIN(BK(J))
C      CBKJ=COS(BK(J))
C      RKX=RK(J)*SBKJ
C      RKY=RK(J)*CBKJ
C      BKN=BK(J)-DK(J)
C      SBKN=SIN(BKN)
```

```
      CBKN=COS(BKN)
C...  LAGEVEKTOR DES KAEFIGSTEGMITTELPUNKTES BZGL. OKJ
      RBKAX=(RBKC+WR(J))*SIN(BKN)
      RBKAY=(RBKC+WR(J))*COS(BKN)
C...  ABLEITUNG
      RBKAPX=(RBKC+WR(J))*BKP(J)*CBKN
      RBKAPY=-(RBKC+WR(J))*BKP(J)*SBKN
C...  VEKTOR VOM MITTELPUNKT DES UNVERFORMTEN KAEFIGS ZUM FIKTIVEN,
C...  TASCHENBEZOGENEN KAEFIGMITTELPUNKT OKJ
      RKNX=RKNC*SIN(BKN)
      RKNY=RKNC*COS(BKN)
      OKOKX=RKX-RKNX
      OKOKY=RKY-RKNY
C...  VEKTOR VOM KAEFIGMITTELPUNKT ZU PUNKT B DES KAEFIGS
      OKBX=OKOKX+RBKAX
      OKBY=OKOKY+RBKAY
C
C...  SCHMIERSPALTKENNGROESSEN UND -KRAEFTE
C...  GESCHWINDIGKEIT OKOKJP DES UNVERFORMTEN KAEFIGMITTELPUNKTES OKJ
C...  GEGENUEBER DEM KAEFIGSCHWERPUNKT OK
      OKOKPX=RKP(J)*SBKJ+(RKY-RKNY)*BKP(J)
      OKOKPY=RKP(J)*CBKJ+(-RKX+RKNX)*BKP(J)
C...  ORTSVEKTOR DES PUNKTES B
      OBX=EKX+OKOKX+RBKAX
      OBY=EKY+OKOKY+RBKAY
C...  ABSOLUTE GESCHWINDIGKEIT DES PUNKTES B
      OBPX=EKPX+OKOKPX
      OBPY=EKPX+OKOKPY
C...  OAK : VEKTOR VOM MITTELPUNKT DES ASSENINGS NACH OKJ
      OAKX=-EAX+EKX+OKOKX
      OAKY=-EAY+EKY+OKOKY
C...  ABLEITUNG
      OAKPX=EKPX+OKOKPX
      OAKPY=EKPX+OKOKPY
      PP=PROJEK(OAKX,OAKY,SBKN,CBKN,0)
      PPP=PROJEK(OAKPX-BKP(J)*OAKY,OAKPY+BKP(J)*OAKX,SBKN,CBKN,0)
      QQ=OAKX**2+OAKY**2-RBRC**2
      QQP=2.*(OAKX*OAKPX+OAKY*OAKPY)
      WW=SQRT(PP**2-QQ)
      ROKJA=-PP+WW
      ROKJAP=-PPP+(2.*PP*PPP-QQP)/(2.*WW)
C...  OKJA : VEKTOR VON OKJ NACH A (AUF AUSSENRING)
      OKJAX=ROKJA*SBKN
      OKJAY=ROKJA*CBKN
C...  BETRAG
      OKJAB=SQRT(OKJAX**2+OKJAY**2)
C...  ABLEITUNG
      OKJAPX=ROKJAP*SBKN+BKP(J)*ROKJA*CBKN
      OKJAPY=ROKJAP*CBKN-BKP(J)*ROKJA*SBKN
C...  ORTSVEKTOR DES PUNKTES A
      OAX=EKX+OKOKX+OKJAX
      OAY=EKY+OKOKY+OKJAY
C...  ABSOLUTE GESCHWINDIGKEIT DES PUNKTES A
      OAPX=EKPX+OKOKPX+OKJAPX
      OAPY=EKPX+OKOKPY+OKJAPY
C...  SCHMIERSPALTHOEHE
      HO=ROKJA-(RBKC+WR(J))
C...  ANNAEHERUNGSGESCHWINDIGKEIT
      VM=(OKJAX*OKJAPX+OKJAY*OKJAPY)/OKJAB
C...  RICHTUNGSCOSINUS DER POSITIVEN Y-RICHTUNG DES LOKALEN KOS
      RLYX=-SBKN
      RLYY=-CBKN
C...  RICHTUNGSCOSINUS DER POSITIVEN U-RICHTUNGDES LOKALEN KOS
      RLUX=RLYY
      RLUY=-RLYX
C...  VEKTOR VOM MITTELPUNKT DES AUSSENINGS ZU PUNKT A DES AUSSENINGS
      RAX=OAKX+ROKJA*SBKN
      RAY=OAKY+ROKJA*CBKN
```

```
C... UMFANGSGESCHWINDIGKEITEN U1, U2
      U1=PROJEK(OAPX,OAPY,RLUX,RLUY,0)
      U2=PROJEK(OBPX,OBPY,RLUX,RLUY,0)-(RBKC+WR(J))*BKP(J)
      CALL DRUCK(1,GFABK,BWC,H0,VM,U1,U2,FY1,FU1,FY2,FU2)
C
C... KAEFIG-VERFORMUNGSKRAEFTE AM KNOTEN J
      F2X=FY2*RLYX+FU2*RLUX
      F2Y=FY2*RLYY+FU2*RLUY
      FWT(J)=FWT(J)+PROJEK(F2X,F2Y,-CBKJ,SBKJ,0)
      FWR(J)=FWR(J)+PROJEK(F2X,F2Y,SBKJ,CBKJ,0)
C... KRAFT AUF KAEFIGSCHWERPUNKT IN EK- UND BEK-RICHTUNG
      FKE=FKE+PROJEK(F2X,F2Y,EKX,EKY,1)
      FKB=FKB+PROJEK(F2X,F2Y,EKY,-EKX,1)
C... MOMENT UM KAEFIGSCHWERPUNKT
      MKJ=MKJ+PROJEK(F2X,F2Y,OKBY,-OKBX,1)
C... VERLUSTLEISTUNG, LAGERKRAFT
      IF(K.EQ.4.AND.BEAPC.NE.0.) THEN
        PRBD=PRBD+RBRC*BEAPC*PROJEK(F1X,F1Y,RAY,-RAX,1)
        FETABD=F1X
        FXSIBD=F1Y
      ENDIF
1 CONTINUE
  RETURN
END
```

C SPLTIB BESTIMMT SCHMIERSPALTKRAEFTE BEI INNENBORDFUEHRUNG
C ===== UNTER BERUECKSICHTIGUNG DER KAEFIGVERFORMUNGEN
C

C E: /KIN/ KINEMATIKGROESSEN VON WAE LZKOERPERN UND
C KAEFIG, KAEFIGVERFORMUNGEN
C /GEO/ LAGER - GEOMETRIEGROESSEN
C /KRIT/ EINZELKRAEFTE UND -REIBLEISTUNGEN IN DEN
C SCHMIERSPALTEN DES DREHENDEN LAGERRINGES
C /FLAGS/ FLAGS FUER KAEFIGBAUART UND -VERFORMUNG
C
C A: FKE KRAFT AUF DEN KAEFIG IN EK-RICHTUNG
C FKB KRAFT AUF DEN KAEFIG IN BEK-RICHTUNG
C MKJ MOMENT DES KAEFIGS UM KAEFIGMITTELPUNKT
C /KVER/ KRAEFTE UND EINFLUSSZAHLEN FUER KAEFIG-
C VERFORMUNG

C VERWENDETE UP : DRUCK

C STAND : 23.03.1987
C
C -----
C

SUBROUTINE S P L T I B (FKE,FKB,MKJ)
IMPLICIT REAL (M)
INTEGER FLAGTL
REAL RP(44),BP(44),AP(44),R(44),B(44),WR(44),WT(44),D(44)
REAL RKP(44),BKP(44)
REAL FWR(44),FWT(44),MD(44)
REAL UR(408,3),UT(408,3),UM(408,3)
REAL FXSI(44),FETA(44),PR(44),FM(8)
REAL FKE1(2),FKB1(2),MKJ1(2),FJR1(2),FJB1(2),MJ1(2)
REAL RK(44),BK(44),DK(44)
COMMON /GEO/ PI,PI2,PIH,RIC,RAC,RKTC,RKIC,RKAC,RTC,RWC,BWC,RSOC,
&EAC,BEAC,EIC,BEIC,OMSOC,OMSOPC,BEAPC,MW,MK,TETA W,TETAK,NW,GAMA,
&BEIPC,EIA,GAMI,DELA,DELI,RBKC,RBRC,BBC,BLAST1,BLAST2,
&GFIW,GFAW,GFWK,GFIBK,GFABK,GFW,GFWKK,RKNC,RKRC
COMMON /FLAGS/ IKFIA,ITKG,IKSE
COMMON /KIN/ RP,BP,AP,R,B,EP,BEP,AKP,EK,BEK,AK,WR,WT,D
COMMON /KRIT/ FXSI,FETA,FXSIBD,FETABD,PR,PRBD,FM,K
COMMON /KVER/ FWR,FWT,MD,NKN,UR,UT,UM

C
C FKE=0.
C FKB=0.
C MKJ=0.
C TNW=PI/NW
C EIX=EIC*SIN(BEIC)
C EIY=EIC*COS(BEIC)
C SBEK=SIN(BEK)
C CBEK=COS(BEK)
C EKX=EK*SBEK
C EKY=EK*CBEK
C EKPX=EP*SBEK+EK*BEP*CBEK
C EKPX=EP*CBEK-EK*BEP*SBEK

C
C... BESTIMMUNG DER SCHMIERSPALTKRAEFTE IN J KNOTEN DES KAEFIGS
DO 1 J=1,NW
RK(J)=RKNC+WR(J)
BK(J)=AK+FLOAT(J-1)*PI2/NW-ATAN(WT(J)/RKNC)
DK(J)=D(J)
BKP(J)=AKP
RKP(J)=0.
C... TRIGONOMETRISCHE FUNKTIONEN VON B(J), BK(J)
SBKJ=SIN(BK(J))
CBKJ=COS(BK(J))
RKX=RK(J)*SBKJ
RKY=RK(J)*CBKJ
BKN=BK(J)-DK(J)
SBKN=SIN(BKN)

```
      CBKN=COS(BKN)
C...  LAGEVEKTOR DES KAEFIGSTEGMITTELPUNKTES BZGL. OKJ
      RBKIX=(RBKC+WR(J))*SIN(BKN)
      RBKIY=(RBKC+WR(J))*COS(BKN)
C...  ABLEITUNG
      RBKIPX=(RBKC+WR(J))*BKP(J)*CBKN
      RBKIPY=-(RBKC+WR(J))*BKP(J)*SBKN
C...  VEKTOR VOM MITTELPUNKT DES UNVERFORMTEN KAEFIGS ZUM FIKTIVEN,
C...  TASCHENBEZOGENEN KAEFIGMITTELPUNKT OKJ
      RKNX=RKNC*SIN(BKN)
      RKNY=RKNC*COS(BKN)
      OKOKX=RKX-RKNX
      OKOKY=RKY-RKNY

C
C...  SCHMIERSPALTKENNGROESSEN UND -KRAEFTE
C...  GESCHWINDIGKEIT OKOKJP DES UNVERFORMTEN KAEFIGMITTELPUNKTES OKJ
C...  GEGENUEBER DEM KAEFIGSCHWERPUNKT OK
      OKOKPX=RKP(J)*SBKJ+(RKY-RKNY)*BKP(J)
      OKOKPY=RKP(J)*CBKJ+(-RKX+RKNX)*BKP(J)
C...  ORTSVEKTOR DES PUNKTES B
      OBX=EKX+OKOKX+RBKIX
      OBY=EKY+OKOKY+RBKIY
C...  ABSOLUTE GESCHWINDIGKEIT DES PUNKTES B
      OBPX=EKPX+OKOKPX
      OBPY=EKPX+OKOKPY
C...  OIOK : VEKTOR VOM MITTELPUNKT DES INNENRINGS NACH OKJ
      OIOKX=-EIX+EKX+OKOKX
      OIOKY=-EIY+EKY+OKOKY
C...  ABLEITUNG
      OIOKPX=EKPX+OKOKPX
      OIOKPY=EKPX+OKOKPY
      PP=PROJEK(OIOKX,OIOKY,SBKN,CBKN,0)
      PPP=PROJEK(OIOKPX-BKP(J)*OIOKY,OIOKPY+BKP(J)*OIOKX,SBKN,CBKN,0)
      PPP=PROJEK(OIOKPX,OIOKPY,SBKN,CBKN,0)
      QQ=OIOKX**2+OIOKY**2-RBRC**2
      QQP=2.*(OIOKX*OIOKPX+OIOKY*OIOKPY)
      WW=SQRT(PP**2-QQ)
      ROKJA=-PP-WW
      ROKJAP=-PPP-(2.*PP*PPP-QQP)/(2.*WW)
C...  OKJA : VEKTOR VON OKJ NACH A (AUF INNENRING)
      OKJAX=ROKJA*SBKN
      OKJAY=ROKJA*CBKN
C...  BETRAG
      OKJAB=SQRT(OKJAX**2+OKJAY**2)
C...  ABLEITUNG
      OKJAPX=ROKJAP*SBKN+BKP(J)*ROKJA*CBKN
      OKJAPY=ROKJAP*CBKN-BKP(J)*ROKJA*SBKN
C...  ORTSVEKTOR DES PUNKTES A
      OAX=EKX+OKOKX+OKJAX
      OAY=EKY+OKOKY+OKJAY
C...  ABSOLUTE GESCHWINDIGKEIT DES PUNKTES A
      OAPX=EKPX+OKOKPX+OKJAPX
      OAPY=EKPX+OKOKPY+OKJAPY
C...  SCHMIERSPALTHOEHE
      HO=(RBKC+WR(J))-ROKJA
C...  ANNAEHERUNGSGESCHWINDIGKEIT
      VM=(OKJAX*OKJAPX+OKJAY*OKJAPY)/OKJAB
C...  RICHTUNGSCOSINUS DER POSITIVEN Y-RICHTUNG DES LOKALEN KOS
      RLYX=SBKN
      RLYY=CBKN
C...  RICHTUNGSCOSINUS DER POSITIVEN U-RICHTUNGDES LOKALEN KOS
      RLUX=RLYY
      RLUY=-RLYX
C...  VEKTOR VOM MITTELPUNKT DES INNENRINGS ZU PUNKT A DES INNENRINGS
      RIX=OIOKX+ROKJA*SBKN
      RIY=OIOKY+ROKJA*CBKN
C...  UMFANGSGESCHWINDIGKEITEN U1, U2
      U1=PROJEK(OAPX,OAPY,RLUX,RLUY,0)
```

```
U2=PROJEK(OBPX,OBPY,RLUX,RLUY,0)+(RBKC+WR(J))*BKP(J)
CALL DRUCK(1,GFWK,BWC,H0,VM,U1,U2,FY1,FU1,FY2,FU2)
C
C...  KAEFIG-VERFORMUNGSKRAEFTE AM KNOTEN J
      F2X=FY2*RLYX+FU2*RLUX
      F2Y=FY2*RLYY+FU2*RLUY
      FWT(J)=FWT(J)+PROJEK(F2X,F2Y,-CBKJ,SBKJ,0)
      FWR(J)=FWR(J)+PROJEK(F2X,F2Y,SBKJ,CBKJ,0)
C...  KRAFT AUF KAEFIGSCHWERPUNKT IN EK- UND BEK-RICHTUNG
      FKE=FKE+PROJEK(F2X,F2Y,EKX,EKY,1)
      FKB=FKB+PROJEK(F2X,F2Y,EKY,-EKX,1)
C...  MOMENT UM KAEFIGSCHWERPUNKT
      OKBX=OKOKX+RBKIX
      OKBY=OKOKY+RBKIY
      MKJ=MKJ+PROJEK(F2X,F2Y,OKBY,-OKBX,1)
C...  VERLUSTLEISTUNG, LAGERKRAFT
      IF(K.EQ.4.AND.BEIPC.NE.0.) THEN
        PRBD=PRBD+RBRC*BEIPC*PROJEK(F1X,F1Y,RIY,-RIX,1)
        FETABD=F1X
        FXSIBD=F1Y
      ENDIF
1 CONTINUE
RETURN
END
```

```
C -----
C
C DEFORM   BESTIMMT DIE VERFORMUNGEN UND VERFORMUNGSGESCHWINDIG-
C ===== KEITEN DES KAEFIG-ERSATZRINGS
C
C E: /KVER/  KRAEFTE UND EINFLUSSZAHLEN FUER KAEFIG-
C           VERFORMUNG
C           /FLAGS/  FLAGS FUER KAEFIGBAUART UND -VERFORMUNG
C           /GEO/    LAGER - GEOMETRIEGROESSEN
C           FWR      RADIALKRAFT AUF ERSATZRINGKNOTEN
C           FWT      TANGENTIALKRAFT AUF ERSATZRINGKNOTEN
C           MD       DREHMOMENT AUF ERSATZRINGKNOTEN
C           UR       EINFLUSSZAHLEN BEI RADIALER BELASTUNG
C           UT       EINFLUSSZAHLEN BEI TANGENTIALER BELASTUNG
C           UM       EINFLUSSZAHLEN BEI MOMENTENBELASTUNG
C
C A: /KVER/  KAEFIG-VERFORMUNGSGROESSEN
C           /KIN/  KINEMATIKGROESSEN VON WAELEZKOERPERN UND
C           KAEFIG, KAEFIGVERFORMUNGEN
C           WR     RADIALE KNOTENVERSCHIEBUNG
C           WT     TANGENTIALE KNOTENVERSCHIEBUNG
C           D      KNOTENVERDREHUNG
C
C VERWENDETE UP: KEINE
C
C STAND           : 24.03.1987
C -----
C
C SUBROUTINE D E F O R M
C IMPLICIT REAL (M)
C REAL RP(44),BP(44),AP(44),R(44),B(44),WR(44),WT(44),D(44)
C REAL FACR(44),FACT(44),FACM(44)
C REAL FWR(44),FWT(44),MD(44)
C REAL UR(408,3),UT(408,3),UM(408,3)
C REAL FXSI(44),FETA(44),PR(44),FM(8)
C COMMON /FLAGS/ IKFIA,ITKG,IKSE
C COMMON /GEO/  PI,PI2,PIH,RIC,RAC,RKTC,RKIC,RKAC,RTC,RWC,BWC,RSOC,
C &EAC,BEAC,EIC,BEIC,OMSOC,OMSOPC,BEAPC,MW,MK,TETA W,TETAK,NW,GAMA,
C &BEIPC,EIA,GAMI,DELA,DELI,RBKC,RBRC,BBC,BLAST1,BLAST2,
C &GFIW,GFAW,GFWK,GFIBK,GFABK,GFW,GFWKK,RKNC,RKRC
C COMMON /KVER/ FWR,FWT,MD,NKN,UR,UT,UM
C COMMON /KIN/  RP,BP,AP,R,B,EP,BEP,AKP,EK,BEK,AK,WR,WT,D
C COMMON /ZEIT/ DT,T,IZS,IZV,IDTK
C
C C... DAEMPfung DER VERFORMUNGEN DURCH BERGRENZUNG AUF 'DT' METER
C... BZW. '20*DT' RAD PRO ZEITSCHRITT AM KNOTEN J
C... DO 4 J=1,NW
C... RELATIVE VERSCHIEBUNG AM KNOTEN J INFOLGE DER KRAFT J GEGENUEBER
C... LETZTEM ZEITSCHRITT
C... WRMAX=0.
C... WTMAX=0.
C... DMAX=0.
C... DO 5 I=1,NW
C... L=NKN+J+1-I
C... IF(L.GT.NKN) L=L-NKN
C... UEBERLAGERN DER STEGVERFORMUNGEN
C... WRMAX=WRMAX+FWR(I)*UR(L,1)+FWT(I)*UT(L,1)+MD(I)*UM(L,1)
C... WTMAX=WTMAX+FWR(I)*UR(L,2)+FWT(I)*UT(L,2)+MD(I)*UM(L,2)
C... DMAX=DMAX+FWR(I)*UR(L,3)+FWT(I)*UT(L,3)+MD(I)*UM(L,3)
C... 5 CONTINUE
C... BEGRENZUNG
C... DRZUL=SIGN(DT,WRMAX-WR(J))
C... DTZUL=SIGN(DT,WTMAX-WT(J))
C... DDZUL=20.*SIGN(DT,DMAX-D(J))
C... BEGRENZUNG FUER RADIALVERFORMUNG
C... IF(ABS(WRMAX-WR(J)).GT.ABS(DRZUL)) THEN
```

```
      WR(J)=DRZUL+WR(J)
    ELSE
      WR(J)=WRMAX
    ENDIF
C
C...  BEGRENZUNG FUER TANGENTIALVERFORMUNG
      IF(ABS(WTMAX-WT(J)).GT.ABS(DTZUL)) THEN
        WT(J)=DTZUL+WT(J)
      ELSE
        WT(J)=WTMAX
      ENDIF
C
C...  BEGRENZUNG FUER VERDREHUNG
      IF(ABS(DMAX-D(J)).GT.ABS(DDZUL)) THEN
        D(J)=DDZUL+D(J)
      ELSE
        D(J)=DMAX
      ENDIF
C
      4 CONTINUE
C
      RETURN
    END
```

```
C -----
C
C DRUCK      BERECHNET DIE SPALTKRAEFTE AUS DEN SPALTKENNGROESSEN
C =====  MIT HILFE DER EHD - NAEHERUNGSGLEICHUNGEN
C
C E: IKR     FLAG FUER KAEFIG- ODER LAGERRINGSPALT
C          HOK      KLEINSTE SCHMIERSPALTHOEHE
C          VM       ANNAEHERUNGSGESCHWINDIGKEIT
C          U1       RELATIVGESCHW. VON KAEFIG ODER LAGERRING IN X-RICHTUNG
(LOKAL)
C          U2       ''          DER ROLLE          ''
C          /MUE/    REIBZAHL BEI TROCKENER REIBUNG
C
C A: FY1     SPALTKRAFT AUF KAEFIG (BZW. LAGERRING)
C          FU1     ''          ''          ''
C          FY2     ''          ''          ''
C          FU2     ''          ''          ''
C
C VERWENDETE UP: KEINE
C
C STAND      : 09.01.1987
C -----
```

```
SUBROUTINE  D R U C K(IEM,GF,BW,H0,VM,U1,U2,FY1,FREIB1,FY2,FREIB2)
REAL MW,IW,MUETR,MUES,MUE1,MUE2,FM(8)
CHARACTER TITEL*20,DAT*10,TIM*10
COMMON /KANAL/ KANAL1,KANAL2,KANAL3,KANAL4,KANAL5,KANAL6,KANAL7
COMMON /ZEIT/ DT,T,IZS,IZV,IDTK
COMMON /MUE/ MUETR
COMMON /EMOD/ EMODK,FEMODR
DATA TITEL /'ABBRUCH IN UP:DRUCK '/
GR=1.E30
C... BERUECKSICHTIGUNG VON ABWEICHENDEM E-MODUL
IF(IEM.EQ.1) THEN
  FEMODK=FEMODR
ELSE
  FEMODK=1
ENDIF
C... TRANSFORMATION VON H0
HOUP=H0*1000.*FEMODK
IF(GF.LT.10.) HOUP=HOUP/GF
C... UMGEHUNG DER NAEHERUNGSGLEICHUNGEN BEI SEHR GROSSEN SPALTHOEHEN
IF(HOUP.GT.0.01) THEN
  FY1=0.
  FY2=0.
  FREIB1=0.
  FREIB2=0.
RETURN
END IF
C... DAEMPfung FUER EINSCHWINGVORGANG BIS IZS=500
IF(IZS.LT.500) THEN
  FACVM=-1.803607214E-2*IZS+10.01803607
ELSE
  FACVM=1.
ENDIF
C... TRANSFORMATION DER EINGABEWERTE
U1UP=U1*1000./GF
U2UP=U2*1000./GF
C VMUP=VM*1000./GF*FACVM
VMUP=VM*1000./GF
BWKUP=BW*1000.
C... NORMALKRAEFTE
U=ABS(U1UP+U2UP)/2.
BASIS=140.-VMUP
IF(BASIS.LT.0.) BASIS=0.
DHNO=4.22E-5*BASIS**0.6655+1.55E-3*ALOG10(6.6E-3*
&(U-20000.)/(164.+ABS(VMUP)-VMUP)+1.)
DHN=(DHNO+ABS(DHNO))/2.-HOUP
```

```
IF(DHN.GT.GR.OR.DHN.LT.-GR) GOTO 99
EXP=SIGN(2671.*ABS(DHN)**1.1,DHN)
IF(EXP.LT.-30.) THEN
  FY2UP=0.
ELSE IF(EXP.GT.30) THEN
  FY2UP=22.*EXP*BWKUP
ELSE
  FY2UP=22.*ALOG10(1.+10.**EXP)*BWKUP
END IF
C...  BERECHNUNG DER FA-REIBKRAEFTE
IF(U1.EQ.U2) THEN
  FREIB1=0.
  FREIB2=0.
C...  RUECKTRANSFORMATION DER ERRECHNETEN KRAEFTE
  FY2=FY2UP*GF
  FY1=-FY2
  RETURN
ENDIF
C...  ABFANGEN VON OVERFLOW-FEHLERN BEI EXTREMEN EX1, EX2, EX3
EX1=-1013.*HOUP+0.8058
EX2=-1022.*HOUP+0.64426
IF(EX1.LT.-30.) THEN
  FI1=0.
ELSE IF(EX1.GT.30.) THEN
  FI1=0.597*EX1
ELSE
  FI1=0.597*ALOG10(1.+10.**EX1)
ENDIF
IF(EX2.LT.-30.) THEN
  FI2=0.
ELSE IF(EX2.GT.30.) THEN
  FI2=0.5926*EX2
ELSE
  FI2=0.5926*ALOG10(1.+10.**EX2)
ENDIF
FI=FI1-FI2
FF=0.01183*U**0.4707*FI
IF(VMUP.LT.0) THEN
  FFAK=-0.2162*ABS(VMUP)**0.8594/(U+500)**0.5791
ELSE IF(VMUP.GT.0) THEN
  FFAK=4.E-4*VMUP
ELSE
  FFAK=0.
END IF
EX3=-1537*HOUP+0.1512
IF(EX3.LT.-30.) THEN
  FA=FF
ELSE IF(EX3.GT.30.) THEN
  FA=FF+FFAK*EX3
ELSE
  FA=FF+FFAK*ALOG10(1.+10.**EX3)
ENDIF
C...  BERECHNUNG DER FB-REIBKRAEFTE
IF(VMUP.GT.0.) THEN
  UV=U+800.-VMUP*50.
  XK=2./(3.E-5*(1.+ABS(UV)+UV))+1.2+VMUP*0.017
ELSE IF(VMUP.LT.-50.) THEN
  XK=1./(3.E-5*(U+13400.))+1.2-1.6/(3.E-8*(U-5000.))**2+1.)
& -(1.+50./VMUP)/(1.+2.7E-5*(U-10000))
ELSE
  UV=U+800.-VMUP*50.
  XK1=2./(3.E-5*(1.+ABS(UV)+UV))+1.2
  XK2=1./(3.E-5*(U+13400.))+1.2-1.6/(3.E-8*(U-5000.))**2+1.)
  XK=XK1*(1.+VMUP/50.)-XK2*VMUP/50.
END IF
FBASY=XK*(1.8E-3/(1.+0.6*(XK-1))-6.E-4-HOUP)
A=5.67E-5*XK*XK+8.E-4
IF(FBASY.LT.-GR.OR.FBASY.GT.GR) THEN
```

```
      IF(A.LT.-GR.OR.A.GT.GR) GOTO 99
      ENDIF
      EXP=FBASY/A
      IF(EXP.LT.-30.)THEN
        FB=0.
      ELSE IF(EXP.GT.30.) THEN
        FB=A*EXP
      ELSE
        FB=A*ALOG10(1.+10.**(EXP))
      END IF
C...  BERECHNUNG DER REIBKRAEFTE
      USI=U1+U2
      FT1=(-SIGN(FA,USI)+(U2UP-U1UP)*FB)*BWKUP
      FT2=(-SIGN(FA,USI)-(U2UP-U1UP)*FB)*BWKUP
C...  BEGRENZUNG DER REIBKRAEFTE
      IF(FY2UP.LT.1.E-10) THEN
        MUE1=MUETR
        MUE2=MUETR
        GOTO 10
      END IF
C...  (BEGINN DER BEGRENZUNG BEI 0.8*MUETR, OBERGRENZE BEI MUETR)
      MUES=ABS(FT1)/FY2UP
      IF(MUES.GT.0.8*MUETR) THEN
        MUE1=MUETR-1./(25.*MUES/(MUETR*MUETR)-15./MUETR)
      ELSE
        MUE1=MUES
      END IF
      MUES=ABS(FT2)/FY2UP
      IF(MUES.GT.0.8*MUETR) THEN
        MUE2=MUETR-1./(25.*MUES/(MUETR*MUETR)-15./MUETR)
      ELSE
        MUE2=MUES
      END IF
10  CONTINUE
      FT1UP=SIGN(MUE1*FY2UP,FT1)
      FT2UP=SIGN(MUE2*FY2UP,FT2)
C...  RUECKTRANSFORMATION DER ERRECHNETEN KRAEFTE
      FY2=FY2UP*GF
      FY1=-FY2
      FREIB1=FT1UP*GF
      FREIB2=FT2UP*GF
      RETURN
99  WRITE(KANAL2,9999)
9999 FORMAT(1X,'***** UP:DRUCK *****')
      WRITE(KANAL2,9998)
9998 FORMAT(1X,'ZAHLENWERT IN REAL NICHT DARSTELLBAR')
      DO 1 I=1,8
1    FM(I)=1.
      CALL DATUMZ(DAT,TIM,CPU)
      CALL DATEI(2,KANAL7,TITEL,IZS,T,DAT,TIM,1.,1.,1.,1.,1.,1.,FM,
&IFMELD)
      STOP
      END
```

CCC

C

AUSG GIBT DIE EINGABEWERTE UND RECHENERGEBNISSE AUS
====

C

C

E: TITEL ARBEITSTITEL
 BB1 VON ROLLE 1 ZURUECKGELEGTER WINKEL
 RES RESULTIERENDE LAGERKRAFT
 GAMMA LAGEWINKEL DER LAGERKRAFT
 PRMI MITTLERE REIBLEISTUNG
 III ANZAHL DER AUF DATEI ABGELEGTEN DATENSAETZE
 TP PERIODENDAUER DER WAE LZKOERPERFREQUENZ IN SEC
 IAB FLAG FUER AUTOMATISCHEN ABBRUCH (=1)
 DAT1 DATUM DES BEGINNS DER RECHNUNG
 TIM1 UHRZEIT DES BEGINNS DER RECHNUNG
 CPU1 UNTER CYBER/NOS : VERBRAUCHTE CPU-ZEIT BEI
 PROGRAMMSTART
 KANAL KANALNUMMER FUER AUSGABE
 SMERK MITTLERER SCHLUPF IN BETA-RICHTUNG
 IMERK ZEITSCHRITTNUMMER ZU BEGINN DER RECHNUNG
 /KIN/ KINEMATIKGROESSEN VON WAE LZKOERPERN UND
 KAEFIG, KAEFIGVERFORMUNGEN

C

C

A: RIC LAUFBAHNRADIUS
 EIC EXZENTRIZITAET
 BEIC EXZENTRIZITAETSWINKEL
 RAC LAUFBAHNRADIUS
 EAC EXZENTRIZITAET
 BEAC EXZENTRIZITAETSWINKEL
 RBRC FUEHRUNGSBORDRADIUS
 BBC FUEHRUNGSBORDBREITE
 WAE LZKOERPER :
 RWC RADIUS
 BWC BREITE
 NW ANZAHL
 KAEFIG :
 EMODK E-MODUL
 RBKC FUEHRUNGSRADIUS
 RKTC MITTENRADIUS
 RKAC AUSSENRADIUS
 RKIC INNENRADIUS
 RKRC STEGKANTENRADIUS
 RTC HALBE TASCHENBREITE (ITKG=1) / TASCHENRADIUS (ITKG=0)
 RSOC ACHSABSTAND
 WAE LZKOERPER :
 MW MASSE
 TETAW MASSENTRAE GHEITSMOMENT
 KAEFIG :
 MK MASSE
 TETAK MASSENTRAE GHEITSMOMENT
 WINKELGESCHWINDIGKEITEN :
 BEAPC LAGERAUSSENRING
 BEIPC LAGERINNENRING
 OMSOC PLANETENRADTRAEGER
 OMES1 1. UMKEHRPUNKT PLANETENRADTRAEGER
 OMES2 2. UMKEHRPUNKT PLANETENRADTRAEGER
 OMSOPC WINKELBESCHLEUNIGUNG DES PLANETENRADTRAEGER
 AN FUEHRUNGSNORMALBESCHLEUNIGUNG
 RES MITTLERE RESULTIERENDE LAGERKRAFT
 GAMMA MITTLERER KRAFTANGRIFFSWINKEL
 SL LAGERSPIEL IN DER LASTZONE
 LST MITTLERE LAGERSTEIFIGKEIT
 BL1G ANFANG THEORETISCHE LASTZONE
 BL2G ENDE THEORETISCHE LASTZONE
 BB1 ZURUECKGELEGTER WINKEL (ROLLE 1)
 SCHB SCHLUPF (ROLLE 1) IN LAGERUMFANGSRICHTUNG
 PRMI MITTLERE REIBLEISTUNG
 MRMI MITTLERES REIBMOMENT

C

C IZS ITERATIONSSCHRITTE
C IZV SCHRITTWEITENVERKLEINERUNGEN
C DT SCHRITTWEITE
C T ZEITBEREICH
C TEIN EINSCHWINGVORGANG IN SEC
C III ZEITSCHRITTE AUF DATEI

VERWENDETE UP: DATUMZ

STAND : 27.03.1987

C
C
C
C
C

SUBROUTINE A U S G (TITEL, BB1, RES, GAMMA, PRMI, III
& , TP, IAB, DAT1, TIM1, CPU1, KANAL, SMERK, IMERK)
IMPLICIT REAL (M)
REAL LST
CHARACTER DAT1*10, DAT2*10, TIM1*10, TIM2*10, DATE*10, TIME*10,
& TITEL*20
COMMON /KANAL/ KANAL1, KANAL2, KANAL3, KANAL4, KANAL5, KANAL6, KANAL7
COMMON /EMOD/ EMODK, FEMODR
COMMON /ZEIT/ DT, T, IZS, IZV, IDTK
COMMON /GEO/ PI, PI2, PIH, RIC, RAC, RKTC, RKIC, RKAC, RTC, RWC, BWC, RSOC,
& EAC, BEAC, EIC, BEIC, OMSOC, OMSOPC, BEAPC, MW, MK, TETAW, TETAK, NW, GAMA,
& BEIPC, EIA, GAMI, DELA, DELI, RBKC, RBRC, BBC, BLAST1, BLAST2,
& GFIW, GFAW, GFWK, GFIBK, GFABK, GFW, GFWKK, RKNC, RKRC
COMMON /FLAGS/ IKFIA, ITKG, IKSE
CALL DATUMZ(DAT2, TIM2, CPU2)
DCPU=CPU2-CPU1
IRECH=IZS-IMERK
EAMY=EAC*1.E6
EIMY=EIC*1.E6
B1=BB1*180./PI
AN=RSOC*OMSOC**2/9.81
IF(BEAPC.NE.0.) MRMI=PRMI/ABS(BEAPC)
IF(BEIPC.NE.0.) MRMI=PRMI/ABS(BEIPC)
BPI=(RAC*BEAPC+RIC*BEIPC)/(RAC+RIC)
IF(KANAL.NE.KANAL2) THEN
TEIN=T-TP
SCHB=0.
IF(TP.NE.0..AND.BPI.NE.0.)
& SCHB=(BB1-B1MERK-TP*BPI)/(TP*BPI)*1.E2*SIGN(1., BPI)
END IF
R=(RAC+RIC)/2.
OMES1=BPI/(R-RSOC)*(-R+SQRT(R*RSOC))
OMES2=BPI/(R-RSOC)*(-R-SQRT(R*RSOC))
IF(OMES1.GT.OMES2) THEN
OMES2=OMEMERK
OMES2=OMES1
OMES1=OMEMERK
ENDIF
BL1G=BLAST1*180/PI
BL2G=BLAST2*180/PI
IF(BL1G.LT.0.) BL1G=360+BL1G
IF(BL2G.LT.0.) BL2G=360+BL2G
SL=(RAC-2.*RWC-RIC-EIA)*1.E6
BEAG=BEAC*180./PI
BEIG=BEIC*180./PI
LST=ABS(RES/SL*1.E6)
TOEL=70.
VOEL=26.
IVOR=1
IF(KANAL.NE.KANAL2) THEN
WRITE(KANAL, 999) IVOR
WRITE(KANAL, 1000)
WRITE(KANAL, 1010) DAT1, TIM1
WRITE(KANAL, 1020) TITEL, DCPU
WRITE(KANAL, 1011) DAT2, TIM2

```
END IF
WRITE(KANAL,1000)
WRITE(KANAL,1030)
WRITE(KANAL,1040) RIC
IF(IKFIA.EQ.1) WRITE(KANAL,1041) RBRC
IF(IKFIA.EQ.1) WRITE(KANAL,1042) BBC
WRITE(KANAL,1043) EIMY
WRITE(KANAL,1044) BEIG
WRITE(KANAL,1050) RAC
IF(IKFIA.EQ.2) WRITE(KANAL,1041) RBRC
IF(IKFIA.EQ.2) WRITE(KANAL,1042) BBC
WRITE(KANAL,1060) EAMY
WRITE(KANAL,1070) BEAG
WRITE(KANAL,1080) RWC
WRITE(KANAL,1090) BWC
WRITE(KANAL,1100) NW
IF(IKFIA.EQ.0.AND.ITKG.EQ.0) WRITE(KANAL,1110)
IF(IKFIA.EQ.0.AND.ITKG.EQ.1) WRITE(KANAL,1115)
IF(IKFIA.EQ.1) WRITE(KANAL,1111)
IF(IKFIA.EQ.2) WRITE(KANAL,1112)
IF(ITKG.EQ.2) WRITE(KANAL,1114)
IF(ITKG.LT.2) WRITE(KANAL,1109) EMODK
IF(IKFIA.GT.0) WRITE(KANAL,1113) RBKC
IF(ITKG.LT.2) WRITE(KANAL,1120) RKAC
IF(ITKG.LT.2) WRITE(KANAL,1130) RKIC
IF(ITKG.EQ.0) WRITE(KANAL,1140) RKTC
IF(ITKG.EQ.0) WRITE(KANAL,1150) RTC
IF(ITKG.EQ.0) WRITE(KANAL,1152) RKRC
IF(ITKG.EQ.1) WRITE(KANAL,1151) RTC
WRITE(KANAL,1160) RSOC
WRITE(KANAL,1000)
WRITE(KANAL,1170)
WRITE(KANAL,1180) MW
WRITE(KANAL,1190) TETAW
IF(ITKG.LT.2) WRITE(KANAL,1200) MK
IF(ITKG.LT.2) WRITE(KANAL,1210) TETAK
WRITE(KANAL,1000)
WRITE(KANAL,1220)
WRITE(KANAL,1230) BEAPC
WRITE(KANAL,1231) BEIPC
WRITE(KANAL,1240) OMSOC
IF(OMSOC.GT.OMES2.OR.OMSOC.LT.OMES1) THEN
  WRITE(KANAL,1241)
ELSE
  WRITE(KANAL,1242)
ENDIF
WRITE(KANAL,1250) OMES1
WRITE(KANAL,1260) OMES2
WRITE(KANAL,1270) OMSOPC
WRITE(KANAL,1280) AN
WRITE(KANAL,1000)
WRITE(KANAL,1281)
WRITE(KANAL,1282) TOEL
WRITE(KANAL,1283) VOEL
WRITE(KANAL,1000)
WRITE(KANAL,1290)
IF(KANAL.NE.KANAL2) THEN
  WRITE(KANAL,1300) RES
  WRITE(KANAL,1310) GAMMA
END IF
WRITE(KANAL,1315) SL
IF(KANAL.NE.KANAL2) WRITE(KANAL,1317) LST
WRITE(KANAL,1320) BL1G
WRITE(KANAL,1330) BL2G
WRITE(KANAL,1000)
IF(KANAL.NE.KANAL2) THEN
  WRITE(KANAL,1340)
  WRITE(KANAL,1350) B1
```

```
WRITE(KANAL,1360) SMERK
WRITE(KANAL,1370) PRMI
WRITE(KANAL,1380) MRMI
WRITE(KANAL,1385) TEIN,T
WRITE(KANAL,1000)
WRITE(KANAL,1390)
WRITE(KANAL,1400) IRECH
IF(IDTK.EQ.0) WRITE(KANAL,1401) IZV
IF(IAB.EQ.1) WRITE(KANAL,1405) TEIN
IF(IDTK.EQ.1) WRITE(KANAL,1410) DT
IF(IDTK.EQ.0) WRITE(KANAL,1411)
WRITE(KANAL,1420) T
WRITE(KANAL,1430) III
WRITE(KANAL,1001)
END IF
```

C

```
999 FORMAT(I1)
1000 FORMAT(4X,'I',73('-'),'I')
1001 FORMAT(4X,'I',32('-'),'RLSI V5.8',32('-'),'I')
1010 FORMAT(4X,'I',40X,'I START : ',A10,' ',A10,' I')
1011 FORMAT(4X,'I',40X,'I ENDE : ',A10,' ',A10,' I')
1020 FORMAT(4X,'I',8X,A20,12X,'I CPU-SEC ',F8.0,13X,'I')
1030 FORMAT(4X,'I G E O M E T R I E',55X,'I')
1040 FORMAT(4X,'I INNENRING',14X,'LAUFBAHRADIUS',9X,'RIC',6X,F10.6
&,' M',5X,'I')
1041 FORMAT(4X,'I',24X,'FUEHRUNGSBORDRADIUS',4X,'RBRC',5X,F10.6
&,' M',5X,'I')
1042 FORMAT(4X,'I',24X,'FUEHRUNGSBORBREITE',4X,'BBC ',5X,F10.6
&,' M',5X,'I')
1043 FORMAT(4X,'I',24X,'EXZENTRIZITAET',9X,'EIC',6X,F10.6,' MYM I')
1044 FORMAT(4X,'I',24X,'EXZENTRIZITAETSWINKEL BEIC ',F10.6
&,' GRAD I')
1050 FORMAT(4X,'I AUSSENRING',13X,'LAUFBAHRADIUS',9X,'RAC',6X,F10.6
&,' M',5X,'I')
1060 FORMAT(4X,'I',24X,'EXZENTRIZITAET',9X,'EAC',6X,F10.6,' MYM I')
1070 FORMAT(4X,'I',24X,'EXZENTRIZITAETSWINKEL BEAC ',F10.6
&,' GRAD I')
1080 FORMAT(4X,'I WAELZKOERPER',11X,'RADIUS',17X,'RWC',6X,F10.6
&,' M',5X,'I')
1090 FORMAT(4X,'I',24X,'BREITE',17X,'BWC',6X,F10.6,' M',5X,'I')
1100 FORMAT(4X,'I',24X,'ANZAHL',17X,'NW',4X,I6,8X,'-',5X,'I')
1109 FORMAT(4X,'I',24X,'E-MODUL EMODK',4X,1PE10.4,
&' N/MM2 I')
1110 FORMAT(4X,'I KAEFIG',17X,'WAELZKOERPERGEFUEHRT',29X,'I')
1111 FORMAT(4X,'I KAEFIG',17X,'INNENBORDGEFUEHRT',32X,'I')
1112 FORMAT(4X,'I KAEFIG',17X,'AUSSENBORDGEFUEHRT',31X,'I')
1113 FORMAT(4X,'I',24X,'FUEHRUNGSRADIUS',8X,'RBKC',5X,F10.6,' M',
&5X,'I')
1114 FORMAT(4X,'I VOLLROLLIG',62X,'I')
1115 FORMAT(4X,'I KAEFIG',17X,'UNGEFUEHRT ! ',29X,'I')
1120 FORMAT(4X,'I',24X,'AUSSENADIUS',11X,'RKAC',5X,F10.6,' M',5X,'I')
1130 FORMAT(4X,'I',24X,'INNENRADIUS',12X,'RKIC',5X,F10.6,' M',5X,'I')
1140 FORMAT(4X,'I',24X,'MITTENRADIUS',11X,'RKTC',5X,F10.6,' M',5X,'I')
1150 FORMAT(4X,'I',24X,'TASCHENRADIUS',10X,'RTC',6X,F10.6,' M',5X,'I')
1152 FORMAT(4X,'I',24X,'STEGKANTENRADIUS',7X,'RKRC',5X,F10.6,' M',
&5X,'I')
1151 FORMAT(4X,'I',24X,'HALBE TASCHENBREITE',4X,'RTC',6X,F10.6,' M',
&5X,'I')
1160 FORMAT(4X,'I PLANETENGETRIEBE',7X,'ACHSABSTAND',12X,'RSOC',5X,
&F10.6,' M',5X,'I')
1170 FORMAT(4X,'I M A S S E N , - T R A E G H E I T S M O M E N T E'
&,23X,'I')
1180 FORMAT(4X,'I WAELZKOERPER',11X,'MASSE',18X,'MW',7X,F10.6
&,' KG',4X,'I')
1190 FORMAT(4X,'I',24X,'MASSENTRAE G H E I T S M O M E N T T H E T A W',2X,1PE11.4
&,' KG*M2 I')
1200 FORMAT(4X,'I KAEFIG',17X,'MASSE',18X,'MK',7X,F10.6,' KG',4X,'I')
1210 FORMAT(4X,'I',24X,'MASSENTRAE G H E I T S M O M E N T T H E T A K',2X,1PE11.4
```

```
&,' KG*M2 I')
1220 FORMAT(4X,'I K I N E M A T I K',55X,'I')
1230 FORMAT(4X,'I WINKELGESCHWINDIGKEIT LAGERAUSSENRING',8X
&,'BEAPC ',F12.6,' 1/S I')
1231 FORMAT(4X,'I',24X,'LAGERINNENRING',9X
&,'BEIPC ',F12.6,' 1/S I')
1240 FORMAT(4X,'I',24X,'PLANETENRADTRAEGER',5X,'OMSOC ',F12.6
&,' 1/S I')
1241 FORMAT(4X,'I',24X,'LAUFBAHNWECHSEL',34X,'I')
1242 FORMAT(4X,'I',24X,'KEIN LAUFBAHNWECHSEL',29X,'I')
1250 FORMAT(4X,'I',8X,'1. UMKEHRPUNKT PLANETENRADTRAEGER'
&,'5X,'OMES1 ',F12.6,' 1/S I')
1260 FORMAT(4X,'I',8X,'2. UMKEHRPUNKT PLANETENRADTRAEGER'
&,'5X,'OMES2 ',F12.6,' 1/S I')
1270 FORMAT(4X,'I BESCHLEUNIGUNG',9X,'PLANETENRADTRAEGER'
&,'5X,'OMSOPC ',F12.6,' 1/S2 I')
1280 FORMAT(4X,'I',24X,'FUEHRUNGSNORMALBESCHL. AN',5X,F12.6,' G'
&,'5X,'I')
1281 FORMAT(4X,'I O E L',67X,'I',/,4X,'I FVA-REFERENZOEL NR.3',
&,'52X,'I')
1282 FORMAT(4X,'I TEMPERATUR ',13X,'TOEL',1X
&,'F14.6,' GRAD',2X,'I')
1283 FORMAT(4X,'I VISKOSITAET ',13X,'VOEL'
&,'F15.6,' CSTK',2X,'I')
1290 FORMAT(4X,'I B E L A S T U N G',55X,'I')
1300 FORMAT(4X,'I MITTLERE RESULTIERENDE LAGERKRAFT',13X,'RES',2X
&,'F14.6,' N',5X,'I')
1310 FORMAT(4X,'I MITTLERER KRAFTANGRIFFSWINKEL',17X,'GAMMA',4X,F10.6
&,' GRAD I')
1315 FORMAT(4X,'I LAGERSPIEL IN DER LASTZONE',20X,'SL',7X,
&,'F10.6,' MYM',3X,'I')
1317 FORMAT(4X,'I MITTLERE LAGERSTEIFIGKEIT',21X,'LST',5X,1PE11.4,
&,' N/M I')
1320 FORMAT(4X,'I THEORETISCHE LASTZONE VON',20X,'BL1G ',3X,F10.6
&,' GRAD I')
1330 FORMAT(4X,'I',24X,'BIS',20X,'BL2G ',3X,F10.6
&,' GRAD I')
1340 FORMAT(4X,'I V E R L U S T L E I S T U N G',43X,'I')
1350 FORMAT(4X,'I ZURUECKGELEGTER WINKEL (ROLLE 1)',14X,'B(1)',1X,F14.6
&,' GRAD I')
1360 FORMAT(4X,'I MITTLERER SCHLUPF IN LAGERUMFANGSRICHTUNG',5X,'SMERK'
&,'4X,F10.6,' 1370 FORMAT(4X,'I MITTLERE REIBLEISTUNG',25X,'PRMI',F15.6
&,' W',5X,'I')
1380 FORMAT(4X,'I MITTLERES REIBMOMENT',26X,'MRMI',5X,F10.6
&,' NM',4X,'I')
1385 FORMAT(4X,'I GEMITTELT VON T=',1PE10.4,' BIS ',1PE10.4,31X,'I')
1390 FORMAT(4X,'I S T E U E R G R O E S S E N',45X,'I')
1400 FORMAT(4X,'I ITERATIONSSCHRITTE',28X,'IZS ',1X,17,8X,'-',5X,'I')
1401 FORMAT(4X,'I SCHRITTWEITENVERKLEINERUNGEN',18X,'IZV ',
&,'1X,17,8X,'-',5X,'I')
1405 FORMAT(4X,'I EINSCHWINGVORGANG BIS',25X,'TEIN ',F10.6,' S',
&,'5X,'I')
1410 FORMAT(4X,'I SCHRITTWEITE',34X,'DT',7X,1PE10.4,' S',5X,'I')
1411 FORMAT(4X,'I SCHRITTWEITE',34X,'DT',7X,' VARIABEL',8X,'I')
1420 FORMAT(4X,'I ZEITBEREICH',35X,'T',8X,F10.6,' S',5X,'I')
1430 FORMAT(4X,'I ZEITSCHRITTE AUF DATEI',24X,'III',2X,17,8X,'-',5X,
&,'I')
RETURN
END
```

```
C -----
C DATEI      SCHREIBT UND LIEST DIE GEOMETRIE- UND ZEITABHAENGIGEN
C =====  DATEN AUF UND VON DATEI
C
C E: FLAG    LESEN      := 1 (OHNE GEOMETRIEWERTE := -1)
C           SCHREIBEN := 2 (OHNE GEOMETRIEWERTE := -2)
C           KANAL    KANALNUMMER FUER EIN/AUSGABE
C           TITEL   ARBEITSTITEL
C           IZS     AKTUELLE ZEITSCHRITTNUMMER
C           T       AKTUELLE ZEIT
C           DAT     DATUM
C           TIM     UHRZEIT
C           EKIN    KINETISCHE ENERGIE DES LAGERS
C           PREIB   REIBLEISTUNG
C           RES     RESULTIERENDE LAGERKRAFT
C           GAMMA   KRAFTANGRIFFSWINKEL
C           SBP     LAGERSCHLUPF
C           SAP     WAELZKOERPERSCHLUPF
C           FM      NORMAL- UND TANGENTIALKRAEFTE DES WAELZKOERPERS
C           /KIN/   KINEMATIKGROESSEN VON WAELZKOERPERN UND
C                 KAEFIG, KAEFIGVERFORMUNGEN
C
C A: IFMELD  KEIN EIN/AUSGABEFUEHLER AUFGETRETEN :=0
C           FEHLER BEIM LESEN DER GEOMETRIEDATEN :=1
C           DATEIENDE GEFUNDEN                 :=2
C
C VERWENDETE UP: KEINE
C
C STAND      : 25.03.1987
C -----
```

```
C
C SUBROUTINE D A T E I (FLAG,KANAL,TITEL,IZS,T,DAT,TIM,EKIN,
C & PREIB,RES,GAMMA,SBP,SAP,FM,IFMELD)
C IMPLICIT REAL (M)
C CHARACTER DAT*10,TIM*10,TITEL*20
C REAL FM(8)
C REAL GR(5,3),GK(6,3)
C REAL GRDU(5,3),GKDU(6,3)
C REAL FWR(44),FWT(44),MD(44)
C REAL UR(408,3),UT(408,3),UM(408,3)
C REAL RP(44),BP(44),AP(44),R(44),B(44),WR(44),WT(44),D(44)
C INTEGER FLAG
C COMMON /KVER/ FWR,FWT,MD,NKN,UR,UT,UM
C COMMON /GRENZ/ GR,GK
C COMMON /EMOD/ EMODK,FEMODR
C COMMON /GEO/ PI,PI2,PIH,RIC,RAC,RKTC,RKIC,RKAC,RTC,RWC,BWC,RSOC,
C &EAC,BEAC,EIC,BEIC,OMSOC,OMSOPC,BEAPC,MW,MK,TETAW,TETAK,NW,GAMA,
C &BEIPC,EIA,GAMI,DELA,DELI,RBKC,RBRC,BBC,BLAST1,BLAST2,
C &GFIW,GFAW,GFWK,GFIBK,GFABK,GFW,GFWKK,RKNC,RKRC
C COMMON /KIN/ RP,BP,AP,R,B,EP,BEP,AKP,EK,BEK,AK,WR,WT,D
C COMMON /FLAGS/ IKFIA,ITKG,IKSE
C IFMELD=0
C IF(IABS(FLAG).EQ.2) THEN
C   IF(FLAG.GT.0) THEN
C     RNW=FLOAT(NW)
C     RKICN=RKIC
C     IF(IKFIA.EQ.1) RKICN=-RKIC
C     RKACN=RKAC
C     IF(IKFIA.EQ.2) RKACN=-RKAC
C     RKNN=RKNC
C     IF(IKSE.EQ.0) RKNN=-RKNC
C     WRITE(KANAL,1100) TITEL,DAT,TIM
C     WRITE(KANAL,1200) RNW,RWC,BWC,MW,TETAW
C     WRITE(KANAL,1300) RIC,EIC,BEIC,BEIPC
C     WRITE(KANAL,1300) RAC,EAC,BEAC,BEAPC
C     WRITE(KANAL,1400) RKTC,RTC,RKICN,RKACN,MK,TETAK
C     WRITE(KANAL,1400) RKNN,EMODK,RKRC,RBRC,KBKC,BBC
```

```
        WRITE(KANAL,1500) RSOC,OMSOC,OMSOPC
    ENDIF
    WRITE(KANAL,1600) IZS,T
    DO 4 J=1,NW
C   4   WRITE(KANAL,1200) RP(J),BP(J),AP(J),R(J),B(J)
    IF(IKSE.EQ.1) THEN
C   8   DO 8 J=1,NW
        WRITE(KANAL,1500) WR(J),WT(J),D(J)
C   ENDIF
        WRITE(KANAL,1400) EP,BEP,AKP,EK,BEK,AK
        WRITE(KANAL,1400) EKIN,PREIB,RES,GAMMA,SBP,SAP
        WRITE(KANAL,1300) (FM(I),I=1,4)
        WRITE(KANAL,1300) (FM(I),I=5,8)
    ELSE
        IF(FLAG.GT.0) THEN
            READ(KANAL,2100,END=12,ERR=12) TITEL,DAT,TIM
            READ(KANAL,2200,END=12,ERR=12) RNW,RWC,BWC,MW,TETAW
            READ(KANAL,2300,END=12,ERR=12) RIC,EIC,BEIC,BEIPC
            READ(KANAL,2300,END=12,ERR=12) RAC,EAC,BEAC,BEAPC
            READ(KANAL,2400,END=12,ERR=12) RKTC,RTC,RKIC,RKAC,MK,TETAK
C
C...   SETZEN DER GEOMETRIE-FLAGS
C...   KREISFOERMIGE TASCHENKONTUR
            ITKG=0
C...   GERADE TASCHENKONTUR
            IF(RKTC.EQ.10.) ITKG=1
C...   VOLLROLLIGES LAGER
            IF(RKTC.EQ.0.) ITKG=2
C...   INNENBORDFUEHRUNG
            IF(RKIC.LT.0.) IKFIA=1
            RKIC=ABS(RKIC)
C...   AUSSENBORDFUEHRUNG
            IF(RKAC.LT.0.) IKFIA=2
            RKAC=ABS(RKAC)
C
            READ(KANAL,2400,END=12,ERR=12) RKNC,EMODK,RKRC,RBRC,RBKC,BBC
            IF(RKNC.GT.0.) IKSE=1
            RKNC=ABS(RKNC)
            READ(KANAL,2500,END=12,ERR=12) RSOC,OMSOC,OMSOPC
            NW=IFIX(RNW)
        ENDIF
        READ(KANAL,2600,ERR=4999,END=4999) IZS,T
        DO 11 J=1,NW
C   11  READ(KANAL,2200) RP(J),BP(J),AP(J),R(J),B(J)
    IF(IKSE.EQ.1) THEN
C   13  DO 13 J=1,NW
        READ(KANAL,2500) WR(J),WT(J),D(J)
C   ENDIF
        READ(KANAL,2400) EP,BEP,AKP,EK,BEK,AK
        READ(KANAL,2400) EKIN,PREIB,RES,GAMMA,SBP,SAP
        READ(KANAL,2300) (FM(I),I=1,4)
        READ(KANAL,2300) (FM(I),I=5,8)
    ENDIF
    RETURN
C   12 IFMELD=1
C... FEHLER BEIM LESEN DER GEOMETRIEDATEN
    RETURN
    4999 IFMELD=2
C... DATEIENDE GEFUNDEN
    RETURN
C
C... WRITE FORMATE
    1100 FORMAT(A20,2A10)
    1200 FORMAT(1P5E13.6)
    1300 FORMAT(1P4E13.6)
    1400 FORMAT(1P6E13.6)
    1500 FORMAT(1P3E13.6)
    1600 FORMAT(I7,1PE13.6)
```

```
C... READ FORMATE  
2100 FORMAT(A20,2A10)  
2200 FORMAT(1P5E13.6)  
2300 FORMAT(1P4E13.6)  
2400 FORMAT(1P6E13.6)  
2500 FORMAT(1P3E13.6)  
2600 FORMAT(I7,1PE13.6)
```

```
C  
END
```



```
C -----
C
C BUFFER LEERT DEN AUSGABEBUFFER FUER EINE SOFORTIGE
C ===== AUSGABE AUF KANAL 'KANAL'
C
C E: KANAL AUSGABEKANAL
C FN ZUGEHORIGER DATEINAME
C
C A: KEINE
C
C VERWENDETE UP: KEINE
C
C STAND : 25.12.1986
C -----
C
C SUBROUTINE B U F F E R (KANAL, FN)
C... ERZWINGT AUSGABE UNMITTELBAR AUF KANAL (CYBER - NOS)
C
C RETURN
C
C CYBER - NOS
C CHARACTER FN*10
C CLOSE(KANAL, ERR=1)
C 1 OPEN(KANAL, FILE=FN, ERR=2)
C 2 RETURN
C
C END
```

```
C -----
C KARPOL          UMWANDLUNG KARTHESISCHER KOORDINATEN IN POLAR-
C =====          KOORDINATEN
C
C E:  X           X-KOORDINATE DER VEKTORSPITZE
C     Y           Y-KOORDINATE DER VEKTORSPITZE
C
C A:  R           BETRAG DES RADIUSVEKTORS
C     W           WINKEL IN BOGENMASS
C
C VERWENDETE UP : KEINE
C
C STAND          : 29.12.1986
C -----
C
C SUBROUTINE  K A R P O L (X,Y,R,W)
C
C   PI=3.141592653589
C   IF(ABS(X).LT.ABS(Y)) GOTO 1
C   W=0.0
C   IF(X.EQ.0.0) GOTO 2
C   W=ATAN(Y/X)
C   IF(X.LT.0.0) W=W+PI
C   GOTO 2
1  CONTINUE
C   W=PI/2.0-ATAN(X/Y)
C   IF(Y.LT.0.0) W=W+PI
2  CONTINUE
C   R=SQRT(X**2+Y**2)
C   W=PI/2.0-W
C   RETURN
C   END
```

```
C -----
C
C REAL FUNCTION PROJEK(X1,Y1,X2,Y2,FLAGB)
C
C STAND          : 05.12.1986
C
C -----
C... PROJIZIERT DEN VEKTOR (X1,Y1) IN DIE RICHTUNG DES VEKTORS (X2,Y2)
C... FLAGB=0 : (X2,Y2) LIEGT ALS EINHEITSVEKTOR VOR
C... FLAGB=1 : AUS (X2,Y2) WIRD ZUERST DER EINHEITSVEKTOR GEBILDET
C... INTEGER FLAGB
C... IF(FLAGB.EQ.1) THEN
C...     B=SQRT(X2**2+Y2**2)
C...     PROJEK=(X1*X2+Y1*Y2)/B
C... ELSE
C...     PROJEK=X1*X2+Y1*Y2
C... ENDF
C... RETURN
C... END
C
C -----
C
C REAL FUNCTION RED(X)
C
C STAND          : 05.12.1986
C
C -----
C... REDUZIERT DEN WINKEL X UM N-VIELFACHE VON PI
C... RED=X-6.283185307178*INT(X/6.283185307178)
C... RETURN
C... END
C
C -----
C
C REAL FUNCTION WA(A,B,C)
C
C STAND          : 05.12.1986
C
C -----
C... BESTIMMT DEN ZU A GEHOERIGEN WINKEL DES DREIECKS ABC
C... WA=ACOS((B*B+C*C-A*A)/2./B/C)
C... RETURN
C... END
```