Institut für Konstruktionstechnik
und Technisches Design
Universität Stuttgart
Prof. Dr.-Ing. H. Binz

Alexander Naubert

Fremdbetätigte Linearkupplungen für klemmtolerante Primärflugsteuerungsaktoren

Bericht Nr. 644

Fremdbetätigte Linearkupplungen für klemmtolerante Primärflugsteuerungsaktoren

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

von
Dipl.-Ing. Alexander Naubert
geboren in Kempten (Allgäu)

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe

Tag der mündlichen Prüfung: 28.03.2018

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design
Universität Stuttgart

2018

D 93

ISBN-13: 978-3-946924-04-3

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design

Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz

Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 9

D-70569 Stuttgart

Telefon +49 (0)711 685-66055

Telefax: +49 (0)711 685-66219

E-Mail: mail@iktd.uni-stuttgart.de

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeiten am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD) der Universität Stuttgart und bei Airbus Group Innovations. Sie ist zum Teil das Ergebnis des HEMAS-Projekts (elektromechanisches Steuerungssystem für Hubschrauber) und des FASTDISC-Projekts (Linearkupplung für klemmtolerante Primärflugsteuerungsaktoren). Letzteres wurde zusammen mit den Firmen Umbra Cuscinetti S.p.A., PyroGlobe GmbH und phi Engineering Services AG durchgeführt. Mein Dank gilt deshalb der europäischen Kommission, den CleanSky-Auftraggebern Airbus Group Innovations sowie den Kooperationspartnern für die Finanzierung und Unterstützung des Projekts.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz für die Betreuung der vorliegenden Arbeit. Sein mir entgegengebrachtes großzügiges Vertrauen hat entscheidend zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen. Zudem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe für die kritische Durchsicht des Manuskripts und die Übernahme des Mitberichts.

Für die zahlreichen fachlichen Diskussionen danke ich den Herren Dipl.-Ing. Matthias Bachmann, Dipl.-Ing. Markus Wagner, Ingenere Stefano Toro, Dr.-Ing. Hans-Jörg Dennig, Dr.-Ing. Alexander Weigand, Dr.-Ing. Peter Lell und Dr.-Ing. Michael Hofmann.

Einen weiteren wesentlichen Beitrag zu dieser Arbeit leisteten die vielen wissenschaftlichen Hilfskräfte, Praktikanten, Studien-, Diplom- und Masterarbeiter sowie die Werkstatt von Umbra Cuscinetti S.p.A., die mich stets beim Bau der Prototypen und der Durchführung der Versuche unkompliziert unterstützte. Ihnen allen bin ich ebenso zu Dank verpflichtet wie meinen Kollegen am IKTD, die durch die stets freundschaftliche Atmosphäre zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Hervorzuheben ist Frau Petra Ertl, die mich in organisatorischen Angelegenheiten während der Zeit am IKTD sowie während des Promotionsverfahrens unterstützte.

Ausgesprochen große Dankbarkeit gilt all meinen Freunden, meinem Bruder Andreas Naubert und meiner Schwester Anita Diergarten, die immer an mich glaubten und mir den nötigen Rückhalt für diese Arbeit gaben.

Den entscheidenden Einfluss zum Gelingen dieser Arbeit leisteten meine Eltern, die mir seit jeher alle Freiheiten gewährten und mir somit erst diesen Weg ermöglichten. Ihnen verdanke ich sehr viel.

München, Oktober 2017 Alexander Naubert

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis I
Bezeichnungen V
Abstract XIII
1 Einleitung und Zielsetzung 1
1.1 Problemstellung 1
1.2 Zielsetzung und Struktur der Arbeit 3
2 Stand der Technik und Forschung 7
2.1 Definitionen und Klassifikationen 7
2.1.1 Differenzierung zwischen geschwindigkeits- und kraftsummierenden Konfigurationen 7
2.1.2 Differenzierung zwischen doppeltem Lastpfad und doppeltem Antriebspfad 8
2.1.3 Unterteilung der Testbarkeit 10
2.1.4 Unterteilung der Reversibilität 11
2.1.5 Definition des Begriffs „n x Hub“-Aktor 13
2.2 Primärflugsteuerung bei Hubschraubern 15
2.3 Klemmtolerante elektromechanische Aktoren mit fremdbetätigten Kupplungen 18
2.4 Fremdbetätigte Wellenkupplungen 23
2.4.1 Zahnkupplung ohne Vorsynchronisierung 24
2.4.2 Zahnkupplung mit Vorsynchronisierung 25
2.4.3 Einflächenkupplung 26
2.4.4 Einscheibenkupplung 28
2.4.5 Lamellenkupplung 29
2.4.6 Kegelkupplung 30
2.5 Pyrotechnische Technologien in Sicherheitsanwendungen 30
2.6 Defizite und Folgerungen für diese Arbeit 35
2.7 Konkretisierung der Zielsetzung 37
3 Planen und Klären der Aufgabe 39
3.1 Konkretisierung der Aufgabenstellung 39
3.2 Anforderungen 39
3.2.1 Art der abzudeckenden Fehler 39
3.2.2 Maximal zulässige Schaltzeit 40
3.2.3 Dynamische Belastungen 40
3.2.4 Statische Belastungen 41

3.2.5 Maximal zulässige Masse der Linearkupplung 42
3.2.6 Umgebungstemperaturen 42
3.2.7 Minimalsteifigkeit der Linearkupplung 43
3.2.8 Maximal zulässiges Axialspiel 44
3.2.9 Maximal zulässige Herstellkosten 44
3.2.10 Anforderungsliste 45
4 Konzeptphase 49
4.1 Reversible fremdbetätigte Linearkupplungen 49
4.1.1 Funktionsstruktur 49
4.1.2 Morphologischer Kasten 52
4.1.3 Konzeptbeschreibungen 58
4.1.3.1 Reversible Variante a) 58
4.1.3.2 Reversible Variante b) 60
4.1.3.3 Reversible Variante c) 62
4.1.3.4 Reversible Variante d) 63
4.1.3.5 Reversible Variante e) 65
4.1.3.6 Reversible Variante f) 67
4.1.4 Bewertung 69
4.2 Irreversible fremdbetätigte Linearkupplungen 74
4.2.1 Funktionsstruktur 74
4.2.2 Morphologischer Kasten 76
4.2.3 Konzeptbeschreibungen 81
4.2.3.1 Irreversible Linearkupplung a) 81
4.2.3.2 Irreversible Linearkupplung b) 82
4.2.3.3 Irreversible Linearkupplung c) 83
4.2.3.4 Irreversible Linearkupplung d) 85
4.2.3.5 Irreversible Linearkupplung e) 86
4.2.3.6 Irreversible Linearkupplung f) 88
4.2.4 Bewertung 90
5 Entwurfsphase 95
5.1 Festigkeitsnachweise der Sperrkugeln 95
5.1.1 Berechnung der Kontaktkräfte 95
5.1.2 Festigkeitsnachweis bei statischer Belastung 100
5.1.3 Festigkeitsnachweis bei dynamischer Belastung 102
5.2 Analyse zu Schwingungsverschleiß 103
5.3 Reversible fremdbetätigte Linearkupplung 105

5.3.1 Aufbau und Funktionsweise 105
5.3.2 Auslegung des Elektromagneten 108
5.4 Irreversible fremdbetätigte Linearkupplung 112
5.4.1 Aufbau und Funktionsweise 112
5.4.2 Auslegung des Pyromechanismus 117
6 Ausarbeitungsphase 123
7 Erprobung 125
7.1 Prüfstand zum Entkuppeln von hohen Lasten 125
7.2 Experimentelle Untersuchungen zur reversiblen Linearkupplung 127
7.2.1 Vorgehensweise und Methoden 127
7.2.2 Messergebnisse 127
7.2.3 Diskussion der Ergebnisse 130
7.3 Experimentelle Untersuchungen zu den irreversiblen Linearkupplungen 131
7.3.1 Vorgehensweise und Methoden 131
7.3.2 Messergebnisse 134
7.3.3 Diskussion der Ergebnisse 140
8 Zusammenfassung 141
9 Ausblick 143
Literaturverzeichnis 145
Anhang 155
A.1 Diagramme zu den Entkoppelungsexperimenten mit der reversiblen Linearkupplung 155
A.2 Urteilsschemata 159
A.3 Auslegung der Wabenstruktur 161
A.4 Auslegung der Druckkammerwand 161

Bezeichnungen

Abkürzungen

$BKNO_3$	Treibladung mit Boron Potassium Nitraten
CAD	rechnerunterstütztes Konstruieren (engl. „computer-aided design“)
EMA	elektromechanische Aktoren
FASTDISC	Projektname bezüglich der Entwicklung von schnell schaltenden Linearkupplungen für Primärflugsteuerungsaktoren des von der EU geförderten Projekts JTI-CS-2012-01-SGO-02-035
FE	Finite Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
FGL	Formgedächtnislegierung
HEMAS	Projektname bezüglich der Entwicklung eines elektromechanischen Steuerungssystems für Hubschrauber (engl. „helicopter electromechanical actuation system“) des von der EU geförderten Projekts JTI CS SGO WP 2.3.4
K1	erste Ausführungsvariante des Kugelgewindetriebs
K2	zweite Ausführungsvariante des Kugelgewindetriebs
NH90	Transporthubschrauber NATO-Helicopter 90
PVAC K006	Treibladung des zweiten irreversiblen Prototyps
PYROTAK	Projektname bezüglich der Entwicklung eines pyrotechnischen Notöffnungsaktuators für eine Flugzeugtüre (gefördert von der Bayrischen Forschungsstiftung)
ZPP	Treibladung Zirconium Potassium Perchlorate

Formelzeichen

Symbol	Einheit	Erläuterung
a	$m/(s \cdot Pa^n)$	Abbrandratensteigung
a_{max}	m/s^2	maximale Beschleunigung des Ausgangskolbens
A	-	Kontaktpunkt A
A_{DK}	m^2	Druckkammeroberfläche
A_p	m^2	Druckfläche der Zughülse

A_{Stifte}	m^2	Querschnittsfläche der Scherstifte
A_T	m^2	gesamte Oberfläche der Treibladungspartikel
A_{WS}	m^2	Querschnittsfläche der Wabenstruktur
$\mathbf{A_{0K}}$, $\mathbf{A_{K1}}$, $\mathbf{A_{12}}$	-	Drehmatrizen zwischen den Koordinatensystemen, 3 x 3 Matrizen
B	-	Kontaktpunkt B
B	T	Betrag der magnetischen Flussdichte
$c_{P,Spule}$	J/(kg·K)	Wärmekapazität der Spule
c_p	J/(kg·K)	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
c_v	J/(kg·K)	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen
C	-	Kontaktpunkt C
$d_{DK,m}$	m	mittlerer Durchmesser der Druckkammerwand
d_O	m	Schnurdicke der O-Ringe
d_0	m	Nenndurchmesser des Kugelgewindetriebs
D_{aH}	m	Hülsenaußendurchmesser
D_{iH}	m	Hülseninnendurchmesser
D_K	m	Durchmesser der Sperrkugel
D_1	m	Außendurchmesser des Kugelmutterkörpers
D_1, D_2, D_3, D_4	m	Krümmungsdurchmesser
$D_{1,A}$, $D_{2,A}$, $D_{3,A}$, $D_{4,A}$	m	Krümmungsdurchmesser im Kontaktpunkt A
$D_{1,B}$, $D_{2,B}$, $D_{3,B}$, $D_{4,B}$	m	Krümmungsdurchmesser im Kontaktpunkt B
$D_{1,C}$, $D_{2,C}$, $D_{3,C}$, $D_{4,C}$	m	Krümmungsdurchmesser im Kontaktpunkt C
D_I	m	Ersatzdurchmesser in Hauptebene I
D_{II}	m	Ersatzdurchmesser in Hauptebene II
E_1	N/mm^2	Elastizitätsmodul von Stahl

E_2	N/mm^2	Elastizitätsmodul von Si_3N_4
E‘	N/mm^2	Ersatz-Elastizitätsmodul
f_F	Hz	Frequenz der Kraft während des Fluges
F	N	Kraft
F_{ax}	N	Betrag der Axialkraft
$\mathbf{F_{ax}}$	$[N, N, N]^T$	Vektor der Axialkraft, 3 x 1 Vektor
$F_{ax,o}$	N	oberer Wert der Axialkraft
F_{EMA}	N	Kraft des elektromechanischen Aktors
F_{ext}	N	extern am Aktor angreifende Kraft
$\mathbf{F_{KGM}}$	$[N, N, N]^T$	Vektor aller an der Kugelgewindemutter angreifenden Kräfte, 3 x 1 Vektor
F_{limit}	N	Lastgrenze
F_{mag}	N	Magnetkraft
F_N	N	Betrag der Normalkraft
$F_{N,A}$	N	Betrag der Normalkraft im Kontaktpunkt A
$\mathbf{F_{N,A}}$	$[N, N, N]^T$	Vektor der Normalkraft im Kontaktpunkt A, 3 x 1 Vektor
$F_{N,B}$	N	Betrag der Normalkraft im Kontaktpunkt B
$\mathbf{F_{N,B}}$	$[N, N, N]^T$	Vektor der Normalkraft im Kontaktpunkt B, 3 x 1 Vektor
$F_{N,C}$	N	Betrag der Normalkraft im Kontaktpunkt C
$\mathbf{F_{N,C}}$	$[N, N, N]^T$	Vektor der Normalkraft im Kontaktpunkt C, 3 x 1 Vektor
$F_{R,Kugeln}$	N	Reibkraft an den Kugeln
$F_{R,O\text{-}Ringe}$	N	Reibkraft an den O-Ringen
F_{Stifte}	N	Scherkraft an den Scherstiften
$F_{ultimate}$	N	Bruchlastgrenze
F_{WS}	N	Stauchkraft der Wabenstruktur
$F_{WS,konst}$	N	konstante Stauchkraft der Wabenstruktur
$F_{WS,peak}$	N	Kraftspitze bei Wabenstrukturen ohne Vorstauchung
h	m	Hub des elektromechanischen Aktors

h_{max}	m	maximale Flughöhe
H	A/m	Betrag der magnetischen Feldstärke
HK	€	Herstellkosten
i	-	Kugelnummer
I	A	Spulenstrom
I_1	A	Strom durch die obere Spule
I_2	A	Strom durch die untere Spule
I_{max}	A	maximaler Spulenstrom
j	-	Anzahl an Treibladungspartikeln
k_φ	-	Anteilfaktor bezüglich ungleichmäßiger Kraftverteilung
K	N/mm^2	Stribecksche Wälzpressung
L	m	Länge der Kugelgewindemutter
L	h	Lebensdauer eines Hubschraubers
L_{0H}	m	anfängliche Druckkammerlänge
$\dot{m}_{gen}$	kg/s	generierter Gasmassenstrom
m_H	kg	Hülsenbaugruppenmasse
m_K	kg	Kupplungsmasse
m_{Spule}	kg	Spulenmasse
m_T	kg	vom elektromechanischen Aktor zu bewegende Masse
$m_{T,0}$	kg	anfängliche Treibladungsmasse
$\mathbf{M}_{KGM}^{(S_M)}$	$[Nm, Nm, Nm]^T$	Vektor aller an der Kugelgewindemutter angreifenden Drehmomente bezüglich des Mutternschwerpunkts, 3 x 1 Vektor
MTBF	h	mittlere Zeitdauer zwischen zwei Ausfällen
MTBO	h	mittlere Zeitdauer bis zur planmäßigen Grundinstandsetzung
n	-	Anzahl der Sperrkugeln
n	-	Abbrandratenexponent

$n_{F/a}$	1/a	durchschnittliche Anzahl von Flügen pro Jahr
n_{max}	1/min	maximale Drehzahl des Kugelgewindetriebs
p	bar	Druck
$p_{DK,max}$	bar	maximaler Druck in der Druckkammer
p_{exp}	bar	experimentell ermittelter Druck
p_H	N/mm^2	Hertz'sche Pressung
$p_{H,A}$, $p_{H,B}$, $p_{H,C}$	N/mm^2	Hertz'sche Pressungen in den Kontaktpunkten A, B, und C
$p_{H,dyn,zul}$	N/mm^2	zulässige Hertz'sche Pressung bei dynamischer Belastung
$p_{H,zul}$	N/mm^2	zulässige Hertz'sche Pressung bei statischer Belastung
p_{sim}	bar	simulativ ermittelter Druck
P_h	m	Steigung des Kugelgewindetriebs
P_t	W	technische Leistung
$\dot{Q}$	W	Wärmestrom
Q_v, Q_w, Q_n	-	Nichtverfügbarkeit vor, während und nach dem Entkuppeln (Werte zwischen 0 für vollständige Verfügbarkeit und 1 für vollständige Nichtverfügbarkeit)
r	m	Radius der Treibladungspartikel
r_0	m	anfänglicher Treibladungspartikelradius
r_b	m/s	Abbrandrate
$\mathbf{r}_A$	$[m, m, m]^T$	Ortsvektor vom Koordinatenursprung zum Kontaktpunkt A, 3 x 1 Vektor
r_K	m	Kugelradius
$\mathbf{r}_{S_M S_K}$	$[m, m, m]^T$	Ortsvektor vom Schwerpunkt der Kugelgewindemutter S_M zum Schwerpunkt der Sperrkugel S_K, 3 x 1 Vektor
R	m	Abstand vom Kugelschwerpunkt zur Achse des Kugelgewindetriebs
R	Ω	Spulenwiderstand
R_s	J/(kg·K)	spezifische Gaskonstante

R_{min}	kN/mm	minimale Steifigkeit der Kupplung
$s_{DK,min}$	-	minimale Wandstärke der Druckkammer
$S_{Entkuppeln}$	-	Sicherheit hinsichtlich erfolgreichen Entkuppelns
S_M	-	Schwerpunkt der Kugelgewindemutter
t	s	Zeit
t_{LM}	s	Zeitdauer des Limitmanövers pro Referenzflug
t_{on}	s	Einschaltzeit der Spule
t_S	s	Schaltzeit
$t_{S,max}$	s	maximale Schaltzeit
T	Nm	Betrag des Torsionsmoments
T	°C	Gastemperatur in der Druckkammer
T	$[Nm, Nm, Nm]^T$	Vektor des Torsionsmoments, 3 x 1 Vektor
T_f	°C	Gasflammentemperatur
$T_{Spule,max}$	°C	maximale Spulentemperatur
T_U	°C	Bereich der Umgebungstemperatur
$T_{U,max}$	°C	maximale Umgebungstemperatur im Ausnahmezustand
T_W	°C	Wandtemperatur der Druckkammer
v_H	m/s	Geschwindigkeit der Hülsenbaugruppe
$v_{max,1}$	m/s	maximale Geschwindigkeit des Ausgangskolbens
$v_{max,2}$	m/s	transiente Geschwindigkeitsspitzen des Ausgangskolbens
V	m^3	Druckkammervolumen
W_{max}	J	maximale kinetische Energie der Hülsenbaugruppe
x_{EMA}	m	Stellweg des elektromechanischen Aktors
x_H	m	Position der Hülsenbaugruppe
$x_{H,exp}$	m	experimentell ermittelte Position der Hülsenbaugruppe
$x_{H,sim}$	m	simulativ ermittelte Position der Hülsenbaugruppe
$\ddot{x}_H$	m/s^2	Beschleunigung der Hülsenbaugruppe

x_{KGT}	m	Position des Kugelgewindetriebs
x_S	m	Stellweg des Ankers
${}_0x$, ${}_0y$, ${}_0z$	-	Achsenrichtungen des inertialen Koordinatensystems 0
${}_Kx$, ${}_Ky$, ${}_Kz$	-	Achsenrichtungen des körperfesten Koordinatensystems K
${}_1x$, ${}_1y$, ${}_1z$	-	Achsenrichtungen des Koordinatensystems 1
${}_2x$, ${}_2y$, ${}_2z$	-	Achsenrichtungen des Koordinatensystems 2
y	-	Beiwert zur Berechnung der Hertz'schen Pressung
α_{Alu}	-	Absorptionsgrad von sandgestrahltem Aluminium
α_{DK}	-	Absorptionsgrad der Druckkammerwand
α_{FE}	-	Absorptionsgrad von poliertem Edelstahl
α_i	rad	Drehwinkel vom Koordinatensystem 0 zum Koordinatensystem K bezüglich der Kugelnummer
α_K	W/(m²·K)	Wärmeübertragungskoeffizient
β_A, β_B, β_C	rad	Drehwinkel vom Koordinatensystem K zum Koordinatensystem 1 bezüglich der Kontaktpunkte
γ_A, γ_B, γ_C	rad	Drehwinkel vom Koordinatensystem 1 zum Koordinatensystem 2 bezüglich der Kontaktpunkte
δ_b/D_W	-	bleibende Verformung
λ_1, λ_2	1/fh	Fehlerraten für „ungewolltes Entkuppeln“ im Normalbetrieb und „Entkoppelungsfehler“ im Bedarfsfall pro Flugstunde
Δx	m	Abstand zwischen dem Schwerpunkt der Kugelgewindemutter und der Kugel in ${}_0x$-Richtung
$\Delta x_{ax,max}$	m	maximal zulässiges Axialspiel der Linearkupplung
$\Delta x_{WS,limit}$	m	maximale Längenänderung der Wabenstruktur
ε_g	-	Emissionsgrad der Verbrennungsgase
η	-	Wirkungsgrad des Kugelgewindetriebs
η_p	-	Korrekturfaktor für reale Gase
η_g	-	Gasgewichtanteil

κ	-	Isentropenexponent
μ	-	Reibkoeffizient
ν_1	-	Querkontraktionszahl von Stahl
ν_2	-	Querkontraktionszahl von Si_3N_4
ρ	kg/m^3	Dichte des Gases in der Druckkammer
ρ_T	kg/m^3	Dichte der Treibladungspartikel
σ	$W/(m^2 \cdot K^4)$	Stefan-Boltzmann-Konstante
$\sigma_{DK,zul}$	N/mm^2	zulässige Spannung der Druckkammerwand
σ_{WS}	N/mm^2	Druckfestigkeit der Wabenstruktur
$\tau_{F,s}$	N/mm^2	Werkstoff-Schubfließgrenze

Indizes

0	inertiales Koordinatensystem 0
1	Koordinatensystem 1
1‘	Koordinatensystem 1‘
1‘‘	Koordinatensystem 1‘‘
2	Koordinatensystem 2
2‘	Koordinatensystem 2‘
2‘‘	Koordinatensystem 2‘‘
i	Kugelnummer
K	körperfestes Koordinatensystem K der Sperrkugel
M	Mutter

Abstract

Externally Actuated Disconnect Devices for Jam-Tolerant Primary Flight Control Actuators

Clean Sky, a public private partnership between the European Commission and the European aeronautics industry, was established to develop eco-friendly technologies. One approach is the electrification of flight systems under the heading “More Electric Aircraft” which comprises the further and new development of customized electric systems with high power density in order to substitute state-of-the-art pneumatic and hydraulic systems.

All flight control actuators of manned aircraft are classified to be key technologies for which mainly servohydraulic actuators, hydraulic actuators with jackscrew assemblies or partly electrohydraulic actuators as backup or standby systems are implemented at present. The latter ones are in fact hydraulic actuators, but they are supplied electrically and generate the hydraulic pressure locally. The logical next step to exploit the potentials of the so called “More Electric Aircraft” approach is the entire absence of fluidic systems by using electromechanical actuators instead.

With regard to the primary flight controls of helicopters, however, significant safety concerns still remain, since this application poses particular challenges for the electromechanical actuation systems. Especially the risk of a jammed drive train is specific for this type of actuators and has to be taken into account during the development phases. The safety-criticality of this application is based on the fact that the mechanical jam of one electromechanical actuator would lead to the loss of the flight control function and generally to a helicopter crash.

Prior to this research work, an approach with redundant electromechanical actuators was chosen that considers the release of a mechanical jam by means of a disconnect device. After the sensory detection, the jammed drive train is converted into a free-wheeling drive train so that at least one redundant actuator is able to take over the flight control function and the flight can be continued safely. Thus, the present research and development work focuses on the new development of externally actuated linear disconnect devices, their implementation possibilities and their integration into the electromechanical drive train. These subassemblies have to be actively controlled, fast switching, compact, lightweight and reliably switching at high preloads. Specifically, this

means that the decoupling shall be performed within the desired shifting times less or equal to 20 ms at preloads up to ±50 kN. Besides, the additional mass of one subassembly shall not exceed 2 kg and the requirement on the available space of the flight control system shall be met strictly to guarantee a direct substitution of the present servohydraulic actuators. Since the disconnect devices are part of safety-critical systems, their sub-functions need to be checked within pre-flight built-in tests so that the detection of malfunctions can be guaranteed at an early stage. Consequently, all relevant causes for a jammed drive train, i.e. notably all damages of rolling contacts, need to be covered by the concepts of the disconnect devices even at harsh environmental conditions. Since the primary flight control actuators are installed close to the gas turbines, the main gear box and the main rotor of the helicopter, the disconnect devices are exposed to intense vibrations, far-reaching environmental temperatures, lighting and fire risks. In addition, the flight profile features hammering loads and small oscillating actuator movements which is particularly adverse for rolling contacts. Following, two technological approaches for disconnect devices are pointed out briefly:

1. Reversible and functionally testable disconnect devices

This group of designs possesses a high degree of operational safety, since the devices are fully testable and reversible within pre-flight built-in tests. In order to cover all relevant failures – which may cause a mechanical jam – the disconnect devices have to be installed close to the output side. Examples for innovative designs are customized mechanisms which provide stored mechanical energy to activate the decoupling processes and use the power of the redundant electromechanical actuators to reset the energy storages.

2. Irreversible disconnect devices

Examples for irreversible devices are pyrotechnically actuated mechanisms as they are often used in safety applications (roll-over bars, seat-belt tensioners, airbags, etc.). They stand out due to their short shifting times, their small number of parts as well as their compact and lightweight designs. Particularly, the dormant failures, which cannot be detected due to the limited testability of the devices, and the unintentional disconnection, e.g. due to a lightning strike or in case of fire, have to be considered.

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Problemstellung

Clean Sky, eine öffentlich-private Partnerschaft zwischen der Europäischen Kommission und der Luftfahrtindustrie, wurde gegründet, um umweltfreundliche Technologien zu entwickeln. Ein Lösungsansatz ist die Elektrifizierung von Flugsystemen unter der Überschrift „More Electric Aircraft“, das die Weiter- und Neuentwicklung von kundenspezifischen elektrischen Systemen mit hoher spezifischer Leistung zur Substitution bestehender pneumatischer und hydraulischer Systeme umfasst.

Als Schlüsseltechnologien gelten alle Stellantriebe für die Steuerung von bemannten Luftfahrzeugen, wofür aktuell vorwiegend servohydraulische Aktoren, hydraulische Aktoren mit Trapezgewindetrieben (siehe Bild 1.1) und teilweise elektrohydraulische Aktoren als Notfall- beziehungsweise Standby-Systeme eingesetzt werden. Letztere sind zwar hydraulische Aktoren, sie werden aber elektrisch versorgt und erzeugen den Hydraulikdruck lokal. Der logische nächste Schritt, um die Potentiale des sogenannten „More-Electric Aircraft“ Ansatzes vollständig auszuschöpfen, ist der komplette Verzicht auf fluidische Systeme durch die Verwendung von elektromechanischen Antrieben.

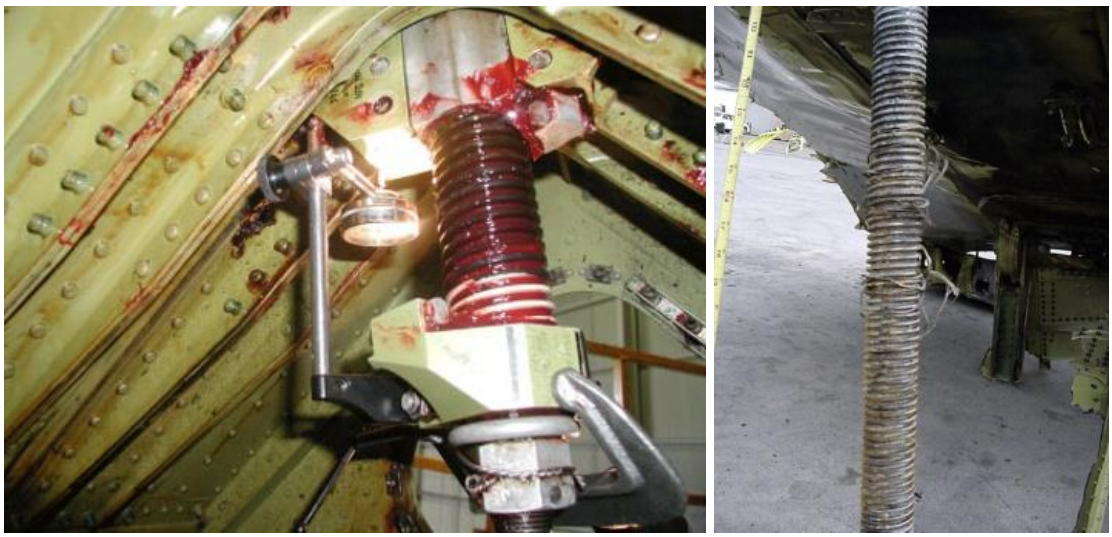


Bild 1.1: Gewindetrieb eines hydraulischen Aktors während der Inspektion (links) und geborgener Gewindetrieb nach dem Flugzeugabsturz einer McDonnell Douglas MD-83 der Alaska Airlines (rechts) [CARMODY02]

Im Hinblick auf die primäre Flugsteuerung von Hubschraubern gibt es allerdings noch immer erhebliche Sicherheitsrisiken, da diese Anwendung für elektromechanische Aktoren (EMA) eine besondere Herausforderung darstellt. Insbesondere der Fehlerfall

eines klemmenden Antriebsstrangs ist für diese Antriebe charakteristisch und muss aufgrund begrenzt verfügbarer Daten, siehe [SAEAIR5713], bei der Entwicklung des elektromechanischen Flugsteuerungssystems berücksichtigt werden. Da das Klemmen eines Stellantriebs ohne Sicherheitselement direkt zum Verlust der Steuerungsfunktion und im Allgemeinen zum Absturz des Hubschraubers führen würde, gilt dieser Anwendungsfall als sicherheitskritisch.

Im Vorfeld dieser Forschungsarbeit wurde ein Lösungsansatz mit redundanten Stellantrieben gewählt, bei dem das Lösen von klemmenden Bauteilen mit Hilfe fremdbetätigter Kupplungen erfolgt. Nach Detektion mittels Sensoren sind die klemmenden Bauteile freizuschalten, sodass ein redundanter Stellantrieb die Steuerungsfunktion des ausgefallenen Aktors für eine sichere Fortsetzung des Flugs übernehmen kann. Die vorliegende Forschungs- und Entwicklungsarbeit setzt demzufolge bei der Neuentwicklung fremdbetätigter Linearkupplungen, deren Umsetzungsmöglichkeiten und ihrer Integration in den elektromechanischen Antriebsstrang an. Diese Baugruppen müssen aktiv steuerbar, schnell schaltend, kompakt, leicht und bei hoher Belastung robust schaltbar sein. Konkret bedeutet dies, dass das Entkuppeln innerhalb der gewünschten Schaltzeit von 20 ms bei Vorspannkräften von bis zu ±50 kN durchzuführen ist. Um eine Substitution der aktuell verwendeten servohydraulischen Aktoren direkt zu ermöglichen, müssen sowohl die Masseanforderung von maximal 2 kg pro Kupplung als auch die Bauraumanforderung an das Flugsteuerungssystems eingehalten werden. Als Bestandteil eines sicherheitskritischen Systems sind möglichst viele Teilfunktionen der Kupplungen im Rahmen von automatisierten Vorflugtests zu überprüfen, mit denen ein frühzeitiges Erkennen von Fehlfunktionen garantiert wird. Folgerichtig sind alle relevanten Fehlerursachen für einen klemmenden Antriebsstrang, d. h. insbesondere alle Schäden an wälzenden Kontakten, von den Kupplungskonzepten auch bei rauen Umgebungsbedingungen abzudecken. Da die primären Flugsteuerungsaktoren in der Nähe der Fluggasturbinen, des Hauptgetriebes und des Hauptrotors frei platziert sind, sind die zu entwickelnden Linearkupplungen starken Vibrationen, weitreichenden Umgebungstemperaturen sowie Blitzschlag- und Brandgefahren ausgesetzt. Hinzu kommt das für wälzende Kontakte ungünstige Belastungs- und Bewegungsprofil von stark hämmernden Lasten und kleinen oszillierenden Stellbewegungen der primären Flugsteuerungsaktoren.

Das Entkuppeln klemmender Antriebsstränge könnte grundsätzlich mittels kommerziell erhältlichen, fremdbetätigten Wellenkupplungen realisiert werden. Werden diese Ma-

schinenelemente jedoch zwischen Motor und Gewindetrieb, z. B. auf der Motorwelle, montiert, können defekte Gewindetriebe nicht mit Hilfe dieser Wellenkupplungen freigeschaltet werden. Konzepte, die mit Wellenkupplungen alle relevanten Fehler kompensieren, erfordern signifikante Modifikationen der Antriebsstränge, siehe [DE102009016797A1], sodass unter anderem unerwünschte Bauraumvergrößerungen und Gewichtserhöhungen die Folge wären. Daraus resultiert die Eingrenzung des Lösungsraums auf die Neukonstruktion fremdbetätigter Linearkupplungen, zu dem im Folgenden zwei technologische Ansätze kurz diskutiert werden:

1. Fremdbetätigte Linearkupplungen in reversibler Ausführung

Diese Lösungen bieten einen hohen Grad an Betriebssicherheit, da sie während automatisierter Vorflugtests vollständig funktional testbar und rücksetzbar sind. Um alle Ursachen abzudecken, die zu einem mechanischen Klemmen führen könnten, sind die Linearkupplungen nahe der Abtriebsseite einzubauen. Beispiele für innovative Konstruktionen stellen kundenspezifische Mechanismen dar, die mechanische Energiespeicher zum Betätigen der Entkoppelungsvorgänge und die Kräfte der redundanten elektromechanischen Aktoren für die Rücksetzung des Energiespeichers verwenden.

2. Fremdbetätigte Linearkupplungen in irreversibler Ausführung

Für die hier betrachtete Anwendung kommen vor allem pyrotechnische Bolzenschneider, pyrotechnische Aktoren und kundenspezifische Mechanismen mit Gasgeneratoren in Frage. Pyrotechnische Mechanismen werden häufig in Sicherheitsanwendungen (Überrollbügel, Gurtstraffer, Airbags, …) eingesetzt und zeichnen sich durch schnelle Betätigungen, geringe Anzahl von Bauteilen sowie leichte und kompakte Bauweisen aus. Besonders zu beachten sind jedoch schlafende Fehler, die aufgrund der limitierten Selbsttest-Fähigkeit nicht erkannt werden können und das ungewollte Auslösen der Pyrotechnik beispielsweise im Fall eines Blitzschlags oder Feuers. Im Vergleich zu reversiblen Konstruktionen werden mit diesem technologischen Ansatz entscheidende Vorteile insbesondere hinsichtlich der leichten Bauweise erwartet, sodass er im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls betrachtet wird.

1.2 Zielsetzung und Struktur der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, fremdbetätigte Linearkupplungen für klemmtolerante Primärflugsteuerungsaktoren gemäß [VDI2221] zu entwickeln und wesentliche Funktionen anhand erster Prototypen experimentell zu überprüfen. Die Vorgehensweise

bei dieser Forschungsarbeit ist in Bild 1.2 skizziert und spiegelt den Aufbau dieser Arbeit wider.

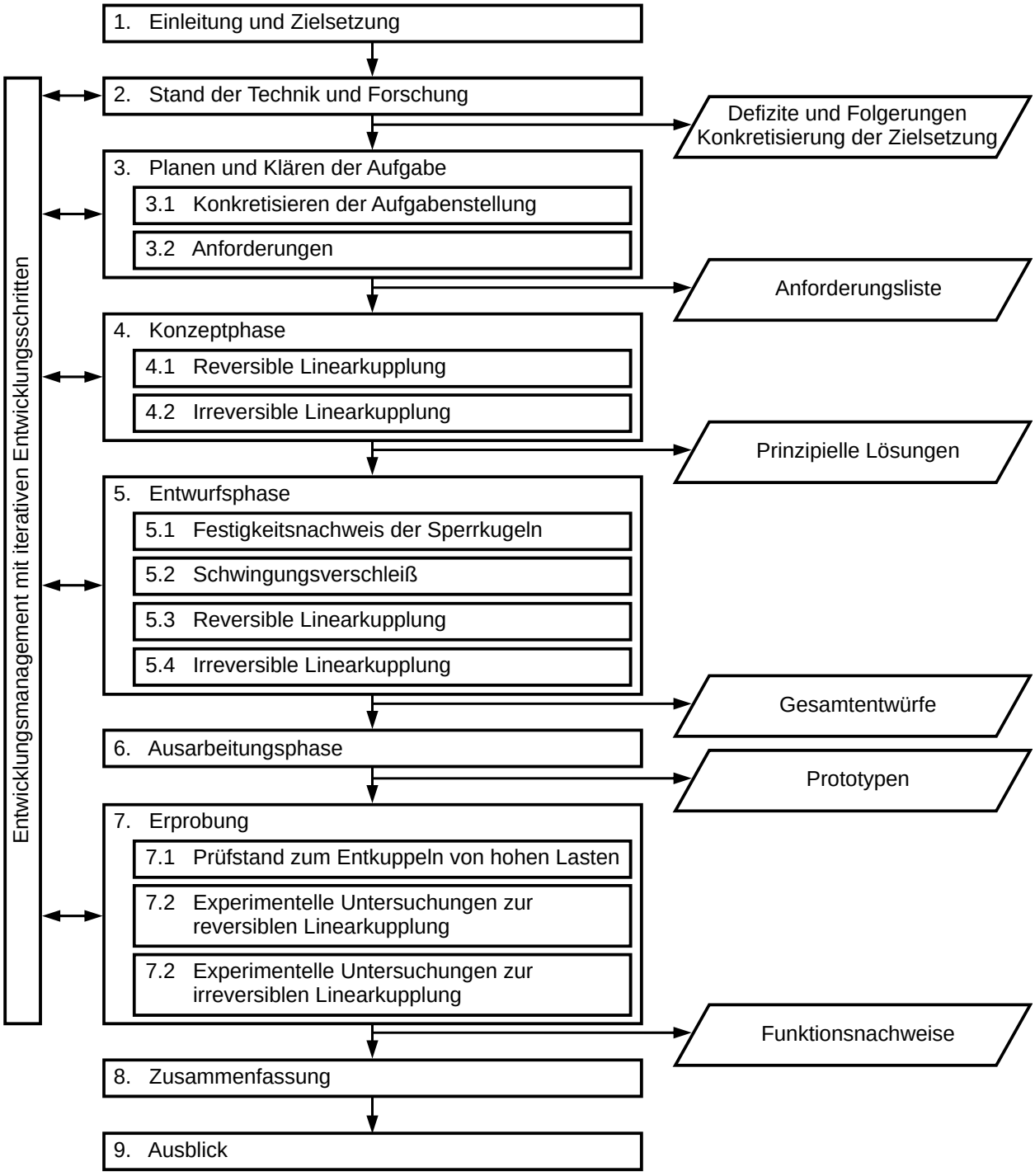


Bild 1.2: Struktur der vorliegenden Arbeit

Kennzeichnend für die durchgeführte Arbeit ist das Zusammenspiel diverser unterschiedlicher Themengebiete, wie sie im einleitenden Kapitel kurz beschrieben werden.

Im anschließenden Kapitel 2 wird der Stand der Technik und Forschung sorgfältig aufgearbeitet. Das erste Unterkapitel umfasst zunächst grundlegende Definitionen und Klassifikationen, die für ein besseres Verständnis der folgenden Markt-, Literatur- und

Patentrecherchen unverzichtbar sind. Hierauf aufbauend deckt das zweite Unterkapitel den Anwendungsfall der primären Flugsteuerung von Hubschraubern ab, befasst sich mit den dort verwendeten servohydraulischen Aktoren sowie den Bestandteilen der vorgesehenen elektromechanischen Aktoren. Das dritte Unterkapitel handelt von klemmtoleranten elektromechanischen Aktoren mit fremdbetätigten Kupplungen und fasst alle relevanten Patente und Veröffentlichungen zu diesem Thema zusammen. Da fremdbetätigte Wellenkupplungen in großer Vielzahl kommerziell erhältlich sind und ihre Teillösungen bei der Neuentwicklung der Linearkupplungen eine Rolle spielen, stehen diese Serienprodukte und ihre Eingruppierungsmerkmale im Fokus des vierten Kapitels. Hintergrund des fünften Unterkapitels zu Pyromechanismen in Sicherheitsanwendungen sind die speziellen Aspekte der irreversiblen Kupplungsaktorik, woraus letztlich alle Defizite der verfügbaren Lösungen identifiziert und Folgerungen für die vorliegende Arbeit abgeleitet werden.

In Kapitel 3 folgen das Planen und Klären der Aufgabe, zu dem die gegebenen Voraussetzungen und alle Anforderungen in Form einer Anforderungsliste festgehalten werden. Insbesondere sind hier die Schnittstellen mit den umliegenden Komponenten, die Umgebungsbedingungen, die auftretenden Lasten, die maximal zulässigen Schaltzeiten, die erforderlichen Ausführungsmerkmale der Kupplungen und die maximalen Herstellungskosten zu nennen.

Das Kapitel 4 „Konzeptphase“ setzt den Entwicklungsprozess der Linearkupplungen fort. Kennzeichnend ist das Erstellen je einer Funktionsstruktur für die reversiblen und irreversiblen Ausführungsvarianten, auf deren Basis jeweils ein morphologischer Kasten entsteht. Geeignete Kombinationen der Wirkprinzipien ergeben diverse Konzepte, die abschließend anhand zuvor definierter Kriterien bewertet werden.

In Kapitel 5 „Entwurfsphase“ werden die Detailkonstruktionen der favorisierten Varianten und die dazugehörigen Auslegungsberechnungen näher betrachtet. Während die Unterkapitel zu den Festigkeitsnachweisen der Sperrelemente und zur Analyse in Bezug auf Schwingungsverschleiß für die reversible und die irreversible Linearkupplung gleichermaßen gelten, zielen die darauf folgenden Berechnungen auf die spezifischen Entkoppelungsvorgänge beider Ausführungsvarianten ab.

Die folgende „Ausarbeitungsphase“ beinhaltet das Erstellen der Produktdokumentation, wie die technischen Zeichnungen, und die Herstellung der Prototypen. Im Rahmen des FASTDISC-Projekts wurde diese Entwicklungsphase von der Firma Umbra Cuscinetti S.p.A. durchgeführt und in Kapitel 6 der Vollständigkeit halber kurz beschrieben.

Charakteristisch für die Hauptfunktionen der Kupplungen sind die Entkoppelungsvorgänge, die mittels der Prototypen und eines eigens für diesen Zweck entwickelten Prüfstandes experimentell überprüft werden. Die Gestaltung des Prüfstands, die experimentellen Methoden sowie die generierten Messergebnisse sind in Kapitel 7 „Erprobung“ dokumentiert.

Abschließend beinhaltet Kapitel 8 eine Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit und Kapitel 9 gibt einen Ausblick auf zukünftige Tätigkeiten.

Diese Arbeit basiert auf veröffentlichten Beiträgen des Autors: [NAUBERT12], [NAUBERT13A], [NAUBERT13B], [NAUBERT14A], [NAUBERT14B], [NAUBERT15A], [NAUBERT15B], [NAUBERT16A], [NAUBERT16B], [TORO16], [EP2837556A1], [EP2840020A2] und [EP2891827A2].

2 Stand der Technik und Forschung

Das Themenfeld der Maßnahmen gegen klemmende Antriebsstränge umfasst diverse unterschiedliche Lösungsansätze und technische Begriffe. Während Zustandsüberwachungssysteme das Auftreten der Versagensfälle prognostizieren und Gegenmaßnahmen so rechtzeitig eingeleitet werden können, zielen andere Lösungsansätze auf Modifikationen der Antriebsstrangkomponenten ab, die das Problem des mechanischen Klemmens an der Ursache behandeln. Als Alternative hierzu konzentrieren sich Systeme mit redundanten Antriebsstrangkomponenten darauf, im Betrieb auftretende Versagensfälle mittels Sicherheitselementen zu kompensieren.

Zur Eingrenzung des Themenfelds werden hier fremdbetätigte Linearkupplungen für redundante Antriebssysteme betrachtet, zu deren Beschreibung zunächst Definitionen und Klassifikationen aufgeführt sind. Neben den vorwiegend für die Luftfahrt entwickelten klemmtoleranten elektromechanischen Aktoren mit fremdbetätigten Kupplungen umfasst dieses Kapitel eine Übersicht bezüglich fremdbetätigter Wellenkupplungen, da deren Wirkprinzipien teilweise für die Entwicklung fremdbetätigter Linearkupplungen relevant sind. Das Unterkapitel zu Pyromechanismen für Sicherheitsanwendungen offenbart den aktuellen Stand im Hinblick auf die irreversible Kupplungsaktorik. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen lassen sich abschließend Defizite und Folgerungen für die Entwicklung der Linearkupplungen ableiten.

2.1 Definitionen und Klassifikationen

Bereits existierende und zu entwickelnde Kupplungen lassen sich anhand der folgenden Definitionen und Klassifikationen einordnen beziehungsweise von anderen Lösungsansätzen ohne fremdbetätigte Kupplungen abgrenzen.

2.1.1 Differenzierung zwischen geschwindigkeits- und kraftsummierenden Konfigurationen

Steuerungssysteme mit redundanten linearen Antriebssträngen lassen sich in *geschwindigkeits-* und *kraftsummierende* Konfigurationen klassifizieren (siehe [NAUBERT13B, S. 6]). Bei der *geschwindigkeitssummierenden* Konfiguration sind mindestens zwei elektromechanische Aktoren zu einem Gesamtantrieb in Reihe geschaltet (siehe Bild 2.1 b)). Die Geschwindigkeit des Gesamtantriebs ergibt sich aus den summierten Einzelgeschwindigkeiten der Einzelantriebe, während die axiale Last für jeden Einzel- und den Gesamtantrieb dieselbe ist.

Werden Antriebsstränge von elektromechanischen Aktoren parallel geschaltet, handelt es sich um eine *kraftsummierende* Konfiguration, bei der sich die Einzelantriebskräfte zur Gesamtantriebskraft aufsummieren und die Geschwindigkeiten im Vergleich zur Konfiguration ohne Redundanz unverändert bleiben (siehe Bild 2.1 a)). Primärflugsteuerungssysteme von Hubschraubern, deren Funktion die Positionierung der drei Taumelscheibenfreiheitsgrade ist, sind folglich ab vier parallel geschalteten elektromechanischen Aktoren redundant.

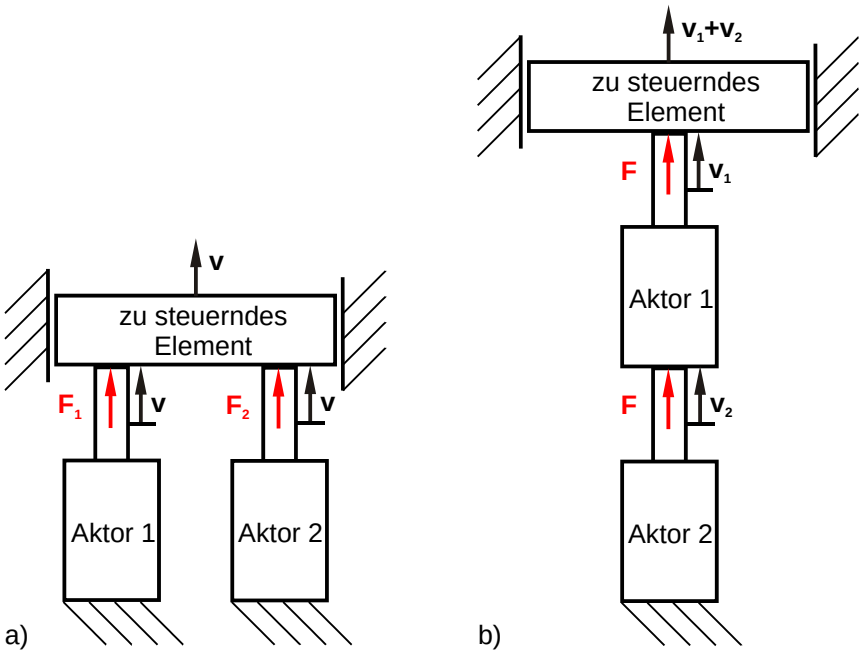


Bild 2.1: Konfigurationen: kraftsummierend a), geschwindigkeitssummierend b)

Der Begriff *torsionssummierend* gilt entsprechend für parallel geschaltete rotatorische Antriebe. Zusätzlich wird er für lineare elektromechanische Aktoren mit redundanten Elektromotoren verwendet.

Die zu entwickelnden Linearkupplungen zielen zwangsläufig auf *kraftsummierende* Konfigurationen ab.

2.1.2 Differenzierung zwischen doppeltem Lastpfad und doppeltem Antriebspfad

Um für sicherheitskritische Anwendungen die notwendige Zuverlässigkeit des Steuerungssystems zu erreichen, sind die beiden Fehlerfälle eines klemmenden oder freilaufenden Antriebsstrangs zu kompensieren. Tritt in einer kraftsummierenden Konfiguration der Fehler eines freilaufenden Antriebsstrangs auf, sind die redundanten Aktoren in der Lage, die Steuerungsfunktion des ausgefallenen Aktors zu übernehmen. Im Fall eines klemmenden Antriebsstrangs wird dieser mittels einer Kupplung freige-

schaltet, d. h. der Fehler des mechanischen Klemmens wird in den Fehler „Freilauf“ gewandelt, sodass die redundanten elektromechanischen Aktoren in gleicher Weise die Steuerungsfunktion des ausgefallenen Aktors übernehmen können. Eine solche Konfiguration besitzt einen sogenannten *doppelten Antriebspfad* (siehe [NAUBERT13B, S. 6f], Bild 2.2 a)).

Um einen *doppelten Antriebspfad* bei einer geschwindigkeitssummierenden Konfiguration zu realisieren, ist hingegen eine Bremse als Sicherheitselement einzubauen (siehe Bild 2.2 b)). Im Fehlerfall des mechanischen Klemmens sorgt der redundante serielle Aktor – mehr als ein redundanter Aktor ist bei geschwindigkeitssummierenden Konfigurationen in der einschlägigen Literatur nicht zu finden und wird als anwendungsfern betrachtet – ohne weitere Vorkehrungen für die sichere Fortführung des Betriebs. Bei einem Freilauf schließt nach Betätigung die Bremse den Kraftfluss des ausgefallenen Antriebs, sodass die Steuerung in analoger Weise durch den redundanten Antrieb fortgesetzt wird. Ist nach einem sicherheitskritischen Fehler weiterhin der volle Aktorhub als Stellweg aufrecht zu erhalten, führt eine geschwindigkeitssummierende Konfiguration zwangsläufig zu einer mindestens doppelt so langen Konfiguration.

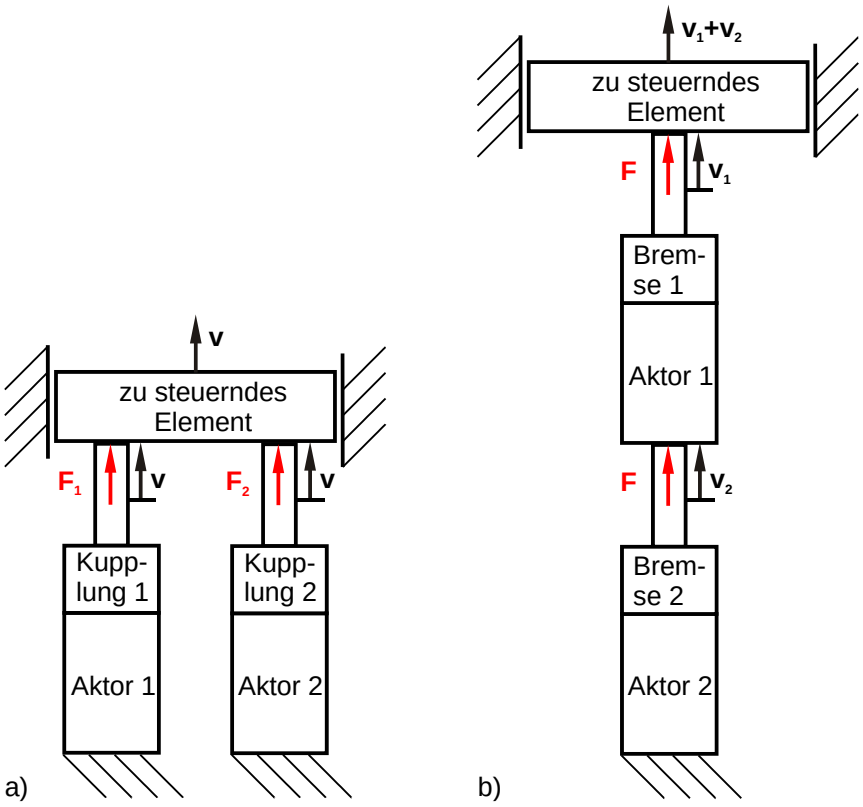


Bild 2.2: Doppelter Antriebspfad: kraftsummierende Konfiguration mit Kupplungen a), geschwindigkeitssummierende Konfiguration mit Bremsen b)

Sicherheitselemente wie die redundante innere Hülse bei einer Kugelgewindespindel in [WHITE09] schließen nach einem Bruch der lasttragenden Maschinenelemente den Kraftfluss wieder und stellen einen *doppelten Lastpfad* her (siehe Bild 2.3). Der Fehlerfall des klemmenden Antriebsstrangs kann mit diesem Sicherheitskonzept nicht kompensiert werden.

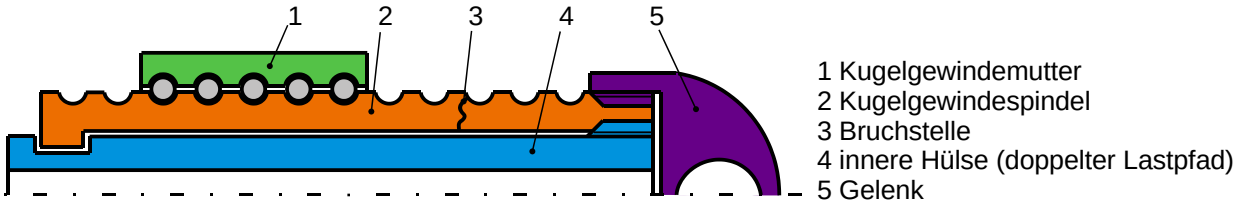


Bild 2.3: Doppelter Lastpfad mit innerer Hülse

Die zu entwickelnden Kupplungen werden in Steuerungssysteme mit *doppeltem Antriebsstrang* eingebaut.

2.1.3 Unterteilung der Testbarkeit

Um die Funktionsfähigkeit der Kupplungen nach mehreren Flugstunden zu gewährleisten, sind kritische Funktionen vor jedem Flug zu überprüfen. Die funktionale Testbarkeit von Kupplungen lässt sich wie folgt unterteilen (siehe [NAUBERT13B, S. 7]):

- Vollständige funktionale Testbarkeit
- Teilweise funktionale Testbarkeit begrenzt durch die Versuchsbedingungen
- Teilweise funktionale Testbarkeit begrenzt durch die Menge der prüfbaren Funktionen
- Keine funktionale Testbarkeit

Kupplungen, die die Eigenschaft der *vollständigen funktionalen Testbarkeit* aufweisen, sind bei realitätsnahen Bedingungen auf ihre Funktionalität zu überprüfen. Eine dieser Bedingungen ist das Testen im belasteten Zustand, da im allgemeinen Klemmfall hohe Vorspannkräfte zu erwarten sind. Um die Grenzlasten während der Vorflugversuche zu simulieren, können redundante elektromechanische Aktoren gegeneinander angesteuert und verspannt werden, bevor die zu testende Kupplung betätigt wird.

Falls die Vorflugversuche beispielsweise bei kleineren Vorspannkräften oder im spannungsfreien Zustand durchgeführt werden, wird eine *teilweise, durch die Versuchsbedingungen begrenzte, funktionale Testbarkeit* garantiert. Eine plausible Extrapolation kann genügen, um von dieser teilweisen funktionalen Testbarkeit Rückschlüsse auf das Entkuppeln bei realitätsnahen Bedingungen zu ziehen. Diese Art der

begrenzten funktionalen Testbarkeit ist gegenüber der vollständigen funktionalen Testbarkeit zu bevorzugen, falls z. B. die Verschleißvorgänge während der Vorflugtests, bei denen das Entkuppeln unter Last durchgeführt wird, zu reduzieren sind.

Bei der *teilweisen – durch die Menge der prüfbaren Funktionen begrenzten – funktionalen Testbarkeit* lassen sich die Funktionen der Kupplung in prüfbare und nicht prüfbare Funktionen unterteilen. Während die ungeprüften Komponentenfunktionen über Jahre ausreichend betriebssicher sein müssen, werden sicherheitskritische Komponentenfunktionen im Rahmen der Vorflugtests überprüft. Ein typisches Beispiel dieser Art der begrenzten funktionalen Testbarkeit stellt die Überprüfung des elektrischen Zündkreislaufs eines pyrotechnischen Gasgenerators mit Hilfe eines Messstroms dar, der die Funktion des elektrischen Energieleitens überprüft und gleichzeitig unterhalb der definierten Betätigungsgrenze liegt. Die funktionale Überprüfung der Freisetzung der in der Pyrotechnik gespeicherten Energie ist nicht während der Vorflugversuche vorgesehen und wird üblicherweise im Rahmen zerstörender Stichprobentests durchgeführt, um als flugtauglich akzeptiert zu werden (siehe [LELL13]).

Kupplungen, für die *keine funktionale Testbarkeit* vorgesehen ist, müssten ebenso diverse Abnahmetests zum Erlangen der Flugtauglichkeit bestehen.

2.1.4 Unterteilung der Reversibilität

Eine weitere Eigenschaft, die eng mit der Testbarkeit von Kupplungen verknüpft ist, bezieht sich auf die Reversibilität des Mechanismus und der Betätigungsaktorik. Diese Eigenschaft lässt sich wie folgt unterteilen (siehe [NAUBERT13B, S. 7f]):

- Automatisierte Reversibilität
- Manuelle Reversibilität
- Keine Reversibilität

Kupplungen, die im Rahmen von Vorflugversuchen vollständig funktional getestet werden, weisen eine *automatisierte Reversibilität* auf. In Bezug auf klemmtolerante Flugsteuerungssysteme sind die Anforderungen während der Rücksetzvorgänge unkritischer als diejenigen während der Entkoppelungsvorgänge, d. h. dass das Entkuppeln im stark belasteten Zustand innerhalb von wenigen Millisekunden durchzuführen ist, während die Rücksetzung im unbelasteten Zustand innerhalb von wenigen Sekunden erfolgen kann. Automatisierte Rücksetzvorgänge in Kombination mit einer vollständigen funktionalen Testbarkeit und kurzen mittleren Betriebsdauern zwischen Tests eignen sich besonders gut, um Kupplungsfehler aufzudecken. Diese Konzepte neigen jedoch

zu größerer Komplexität, größerem Bauraumbedarf und mehr Masse als Kupplungen, die für eine einmalige Anwendung entwickelt sind.

Kupplungen, bei denen eine *manuelle Reversibilität* vorgesehen ist, weisen vorzugsweise eine kleinere Antriebskraft im Vergleich zur Schaltkraft auf. Dies kann beispielsweise realisiert werden, indem der Antrieb einen Energiespeicher zum Entkuppeln des Mechanismus freigibt, während die Rücksetzung des Enerigespeichers manuell durchzuführen ist. Durch die Aufteilung in je einen Entkoppelungs- und Einkoppelungsantrieb sind kompakte und leichte Konstruktionen zu erwarten, bei denen einzig auf die räumliche Zugänglichkeit der Rückstellwerkzeuge zu achten ist. In der Luftfahrtindustrie werden Antriebe mit manueller Reversibilität häufig für die einmalige Betätigung im Betrieb und die vollständige funktionale Testbarkeit im Labor entwickelt (siehe [HIHOUD12]).

Die kleinste Anzahl an Bauteilen, die geringste Kupplungsmasse und der geringste Bauraumbedarf sind bei Kupplungen mit *keiner Reversibilität* zu erwarten. Sie werden ausschließlich für die einmalige Anwendung im Betrieb entwickelt und müssen üblicherweise diverse Abnahmetests zur Erreichung der Flugtauglichkeit bestehen.

Zusammenfassend zeigt Bild 2.4 die Auswahlmöglichkeiten bezüglich der Eigenschaften der Testbarkeit und Reversibilität von fremdbetätigten Kupplungen.

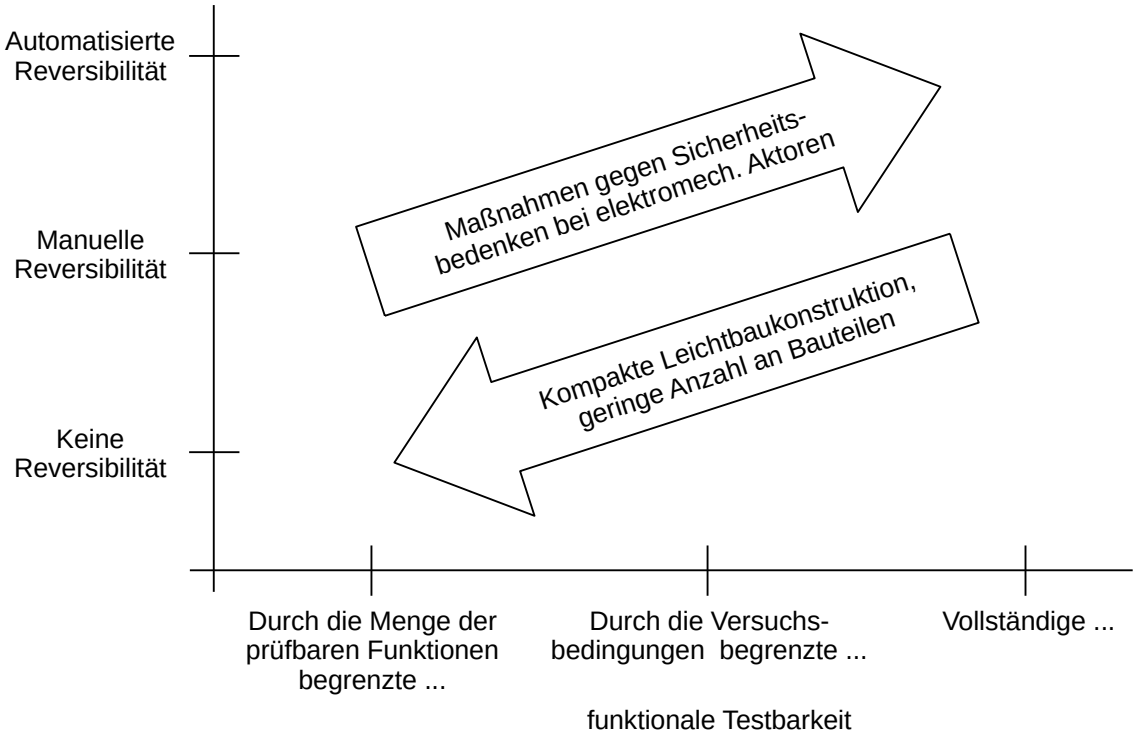


Bild 2.4: Auswahlmöglichkeiten und Tendenzen hinsichtlich Testbarkeit und Reversibilität (angelehnt an [NAUBERT13B, S. 8])

Je nach gewählten Eigenschaftsstufen tendieren die Kupplungskonzepte zu leichten oder schweren Konstruktionen, zu kompakten oder umfangreicheren Bauräumen und zu einer geringen oder größeren Anzahl an Bauteilen. Die Kombination aus vollständiger funktionaler Testbarkeit und automatisierter Reversibilität wirkt am besten Sicherheitsbedenken bei elektromechanischen Aktoren entgegen.

2.1.5 Definition des Begriffs „n x Hub“-Aktor

Als Maschinenelement im Antriebsstrang des elektromechanischen Aktors beeinflusst die Kupplung je nach Art und Einbauposition die Gestaltung anderer Antriebsstrangkomponenten. Wesentliche geometrische und massebezogene Änderungen, die auf das Kupplungskonzept zurückzuführen sind, werden bereits in der frühen Entwicklungsphase berücksichtigt. Ein häufig begrenzender Geometrieeinfluss ist beispielsweise die Gesamtlänge des elektromechanischen Aktors, da in „More Electric Aircraft“-Projekten zum Teil Umbaukonstruktionen erforderlich sind, bei denen hydraulische Systeme direkt durch elektromechanische Systeme ersetzen werden. Im konkreten Anwendungsbeispiel sind die Anschlussgelenke des Flugsteuerungsaktors an der Taumelscheibe und dem Hubschrauberhauptgetriebe nicht zu verändern. Da die charakteristische Länge eines Aktors sein Hub ist, wird der Begriff „n x Hub“-Aktor zur Bewertung der Kupplungen wie folgt definiert (siehe [NAUBERT12]):

Der Parameter n spezifiziert die minimale Aktorlänge als erforderliches Vielfaches des nominellen Aktorhubs in eingefahrener Aktorposition.

Längenmaße wie die Kugelgewindemutterlänge, die unabhängig vom Kupplungskonzept zur Gesamtlänge des elektromechanischen Aktors beitragen, sind in dieser Betrachtungsweise unberücksichtigt. Bild 2.5 zeigt drei Beispiele, bei denen die Unterschiede in den Gesamtlängen der elektromechanischen Aktoren besonders signifikant sind.

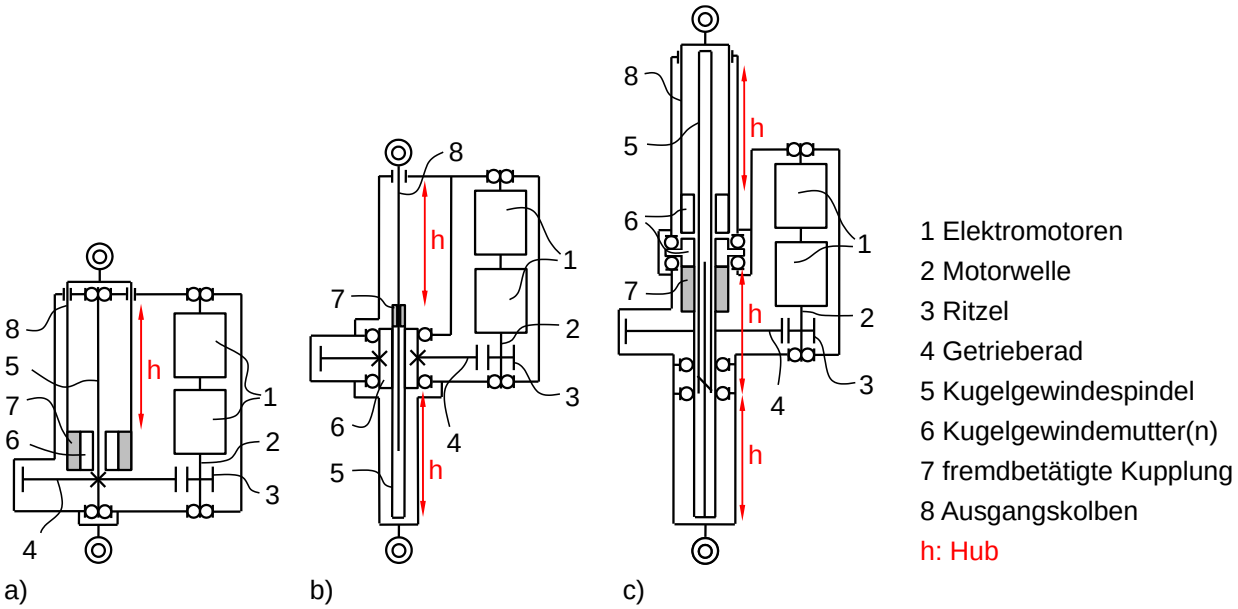


Bild 2.5: Beispiele für klemmtolerante Aktoren mit fremdbetätigten Kupplungen im Antriebsstrang: a) „1 x Hub“-Aktor, b) „2 x Hub“-Aktor, c) „3 x Hub“-Aktor (angelehnt an [NAUBERT12])

Die wesentlichen Unterschiede zwischen den dargestellten Kupplungskonzepten sind ihre Einbaupositionen in den Antriebssträngen und das Leiten bzw. Nicht-Leiten von Drehmoment und/oder Axiallasten. Während diverse Wellenkupplungen standardmäßig verfügbar sind und sich modular einsetzen lassen, eignen sie sich für die vorliegende Entwicklungsaufgabe nur bedingt. Zum einen sind Konzepte mit Wellenkupplungen auf der Motor- oder einer Getriebewelle auszuschließen, da sie den kritischen Fehlerfall des Gewindetriebklemmens nicht abdecken. Zum anderen beeinträchtigen Konfigurationen, die diesen Fehlerfall mit Hilfe einer Wellenkupplung berücksichtigen, die Gesamtlänge des elektromechanischen Aktors erheblich. Als einschlägiges Beispiel zeigt Bild 2.5 c) einen klemmtoleranten elektromechanischen Aktor mit integrierter Wellenkupplung, bei dem zwei Kugelgewindemuttern auf einer Kugelgewindespindel montiert sind (siehe auch Kapitel 2.3, [DE102009016797A1]). Während im Normalbetrieb die obere Kugelgewindemutter die translatorische Bewegung auf der oberen Spindelhälfte ausführt, wird die zweite Kugelgewindemutter und untere Spindelhälfte zum Ausfahren des klemmenden Aktors gebraucht, falls der Fehlerfall im eingefahrenen Zustand auftritt. Die zweite Kugelgewindemutter läuft dann nach dem Öffnen der Wellenkupplung im Reversierbetrieb. Klemmt der Aktor im ausgefahrenen Zustand, wird die vollständige Einfahrbewegung durch den bereitgestellten Freiraum unterhalb der Kugelgewindespindel ermöglicht. Nach obiger Definition ist dieses Konzept ein „3 x Hub“-Aktor.

Bei den in Bild 2.5 a) und Bild 2.5 b) dargestellten klemmtoleranten Aktoren sind stattdessen die spezifizierten Axiallasten und je nach Verdrehsicherungskonzept des Gewindetriebs zusätzlich die Drehmomente des Gewindetriebs zu übertragen bzw. freizuschalten. Einerseits steigen bei diesen Konzepten die Belastungen auf die Kupplungen, da die Axiallasten für den spezifizierten Gewindetrieb die maßgeblichen Belastungen darstellen. Andererseits ergibt sich der wesentliche Vorteil in der Realisierung eines „1 x Hub“-Aktors (siehe auch Kapitel 2.3, [US8336818B2]) bzw. eines „2 x Hub“-Aktors (siehe auch Kapitel 4.1.3.1), bei denen Abmessungen und Massen der anderen Antriebskomponenten vergleichsweise wenig beeinflusst werden. Des Weiteren basieren die Konzepte der „1 x Hub“- und „2 x Hub“-Aktoren für den entkoppelten Zustand nicht auf dem Reversierbetrieb des Kugelgewindetriebs, wie es bei Konzepten mit Wellenkupplungen, siehe Bild 2.5 c), erforderlich ist. Aus den genannten Gründen steht die Entwicklung von fremdbetätigten Linearkupplungen im Fokus dieser Arbeit.

2.2 Primärflugsteuerung bei Hubschraubern

Gegenwärtig erfolgt die Primärflugsteuerung von bemannten Hubschraubern durch die Positionierung einer Taumelscheibe, die als Steuerelement die Eingaben des Piloten auf die drehenden Rotorblätter überträgt. Hierfür besitzt das untere Taumelscheibenbauteil einen angesteuerten Translationsfreiheitsgrad entlang der Rotormastachse und zwei angesteuerte Rotationsfreiheitsgrade senkrecht zu dieser. Im Betrieb des Hubschraubers kreist das obere Taumelscheibenbauteil synchron mit dem Rotor und leitet die mechanische Energie zur Steuerung des Hubschraubers über Steuerstangen an die Rotorblattaufnehmer weiter. Da jede Steuerstangenachse windschief zur jeweiligen Rotorblattachse angeordnet ist und die Rotorblattaufnehmer gelenkig gelagert sind, lassen sich mit der Positionierung der Taumelscheibe alle Rotorblätter um ihre Längsachse gleichzeitig aber im Allgemeinen mit unterschiedlichen Anstellwinkeln verdrehen. In direkter Abhängigkeit zu diesen Anstellwinkeln verhalten sich die Rotorblattauftriebskräfte, mit denen die Richtung des Hubschrauberflugs beeinflusst wird. Standardmäßig positionieren drei hydraulische Aktoren das untere Taumelscheibenbauteil, die oft wie in Bild 2.6 links dargestellt direkt unterhalb der Taumelscheibe angeordnet und eingebaut werden.

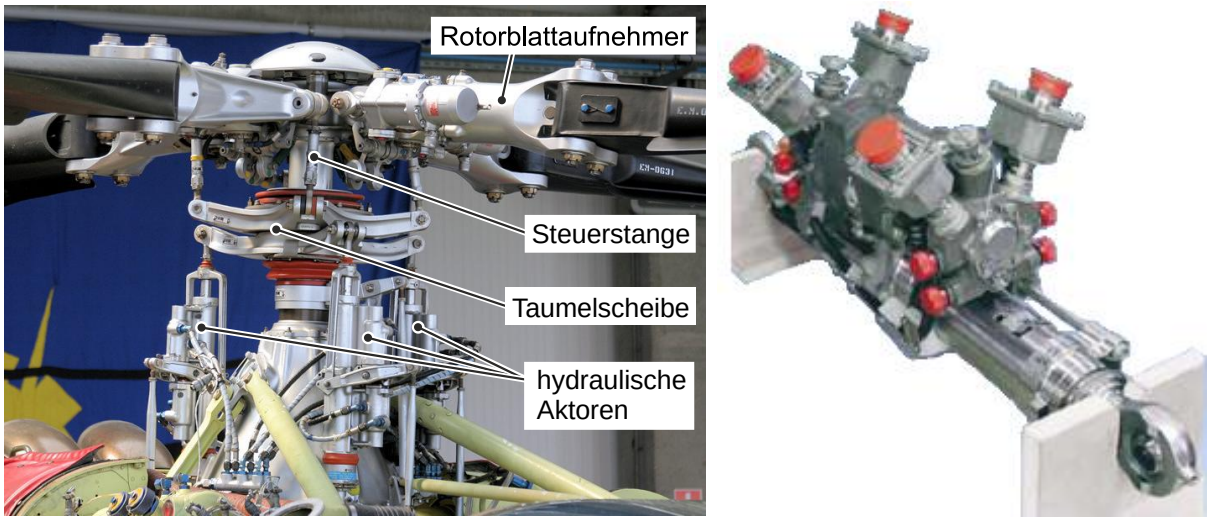


Bild 2.6: Rotorkopf inklusive Primärflugsteuerungsaktoren eines Agusta A109 Hubschraubers nach [DOMKE15] (links), elektrohydraulischer Primärflugsteuerungsaktor eines NH90-Hubschraubers [LIEBHERR15] (rechts)

Generell lassen sich die hydraulischen Primärflugsteuerungsaktoren von Hubschraubern in zwei wesentliche Gruppen unterteilen. Die erste Gruppe umfasst hydromechanische Aktoren, bei denen mechanische Elemente zur Übertragung der Steuereingaben vom Piloten zu den Aktoren verwendet werden. Im Unterschied hierzu werden bei der zweiten Gruppe, den elektrohydraulischen Aktoren, diese Steuereingaben elektrisch übertragen, sodass diese Technik sinngemäß mit dem Begriff „Fly-by-Wire Technologie“ bezeichnet wird. Bild 2.6 rechts zeigt exemplarisch einen elektrohydraulischen Aktor eines Transporthubschraubers. Um den anwendungssicheren Betrieb zu gewährleisten, können hydraulische Primärflugsteuerungsaktoren, wie in [GOODRICH15] beschrieben, redundante hydraulische Kreisläufe und Erkennungsvorrichtungen für klemmende Ventile aufweisen. Aktuelle Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu umweltfreundlichen elektrischen Technologien zielen auf den direkten Austausch von hydraulischen Aktoren ab, wobei die Primärflugsteuerung als Schlüsseltechnologie für einen vollständig elektrisch betriebenen Hubschrauber zählt. Potentielle Konfigurationen mit redundanten elektromechanischen Aktoren werden hierzu in [CHRISTMANN10] analysiert. Die zu entwickelnden Kupplungen eignen sich für diejenigen kraftsummierenden Konfigurationen, bei denen ein mechanisch klemmender Antriebsstrang linear zu entkoppeln ist.

Bild 2.7 zeigt dazu den prinzipiellen Aufbau eines elektromechanischen Aktors, dessen redundanter Elektromotor (d. h. im Inneren des Motorgehäuses weisen zwei Elektromo-

toren eine gemeinsame Motorwelle auf) über ein zweistufiges Zahnradgetriebe einen Kugelgewindetrieb antreibt.

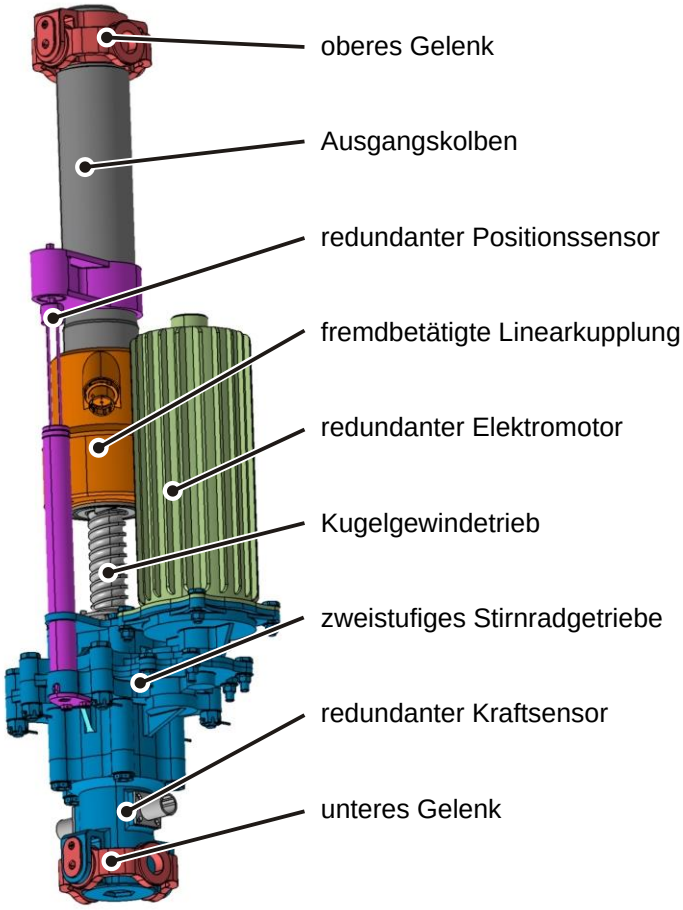


Bild 2.7: Konzept eines elektromechanischen Primärflugsteuerungsaktors (angelehnt an [NAUBERT12])

Die fremdbetätigte Linearkupplung sitzt hier zwischen Kugelgewindemutter und Ausgangskolben und überträgt im Normalbetrieb des Aktors den axialen Kraftfluss. Letzterer wird mit zwei in O-Anordnung eingebauten Spindellagerpaaren zwischen Kugelgewindespindel und Aktorgehäuse übertragen. Um hohe statische und dynamische Tragzahlen des Kugelgewindetriebs zu erreichen, wird eine lang bauende Kugelgewindemutter mit relativ großen Wälzkörpern ausgestattet, deren fettgeschmierter Raum mit Eiskratzern und Dichtungen von der Umgebung getrennt ist. Mit Gelenken erfolgt die Anbindung zu angrenzenden Strukturen. Der elektromechanische Aktor weist zwei Differentialtransformatoren (redundanter Positionssensor) zur absoluten Positionsmessung, zwei Resolver für den redundanten Elektromotor sowie zwei Kraftsensoren (redundanter Kraftsensor) zur Detektion des mechanischen Klemmens auf. Die Leistungselektronik des Aktors ist in Bild 2.7 nicht dargestellt.

2.3 Klemmtolerante elektromechanische Aktoren mit fremdbetätigten Kupplungen

Um elektromechanische Linearaktoren für sicherheitskritische Luftfahrtanwendungen zertifiziert zu bekommen, arbeiten Forschungs- und Entwicklungsinstitute an fremdbetätigten Kupplungen zum Freischalten klemmender Antriebsstränge. Die einschlägigsten Konstruktionen hierzu folgen in diesem Unterkapitel.

In [US8336818B2] wird ein klemmtoleranter elektromechanischer Aktor mit einer fremdbetätigten Linearkupplung zwischen der Kugelgewindemutter und dem Ausgangskolben beschrieben (siehe Bild 2.8).

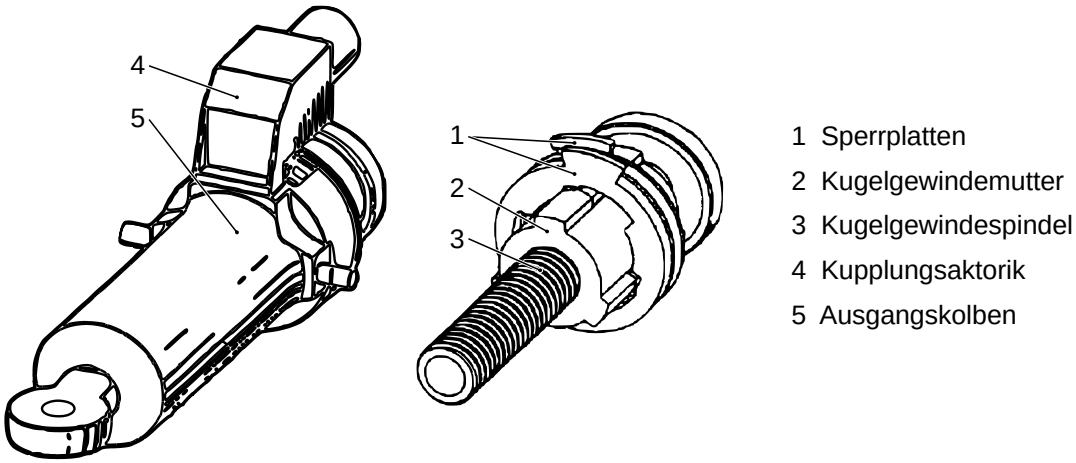


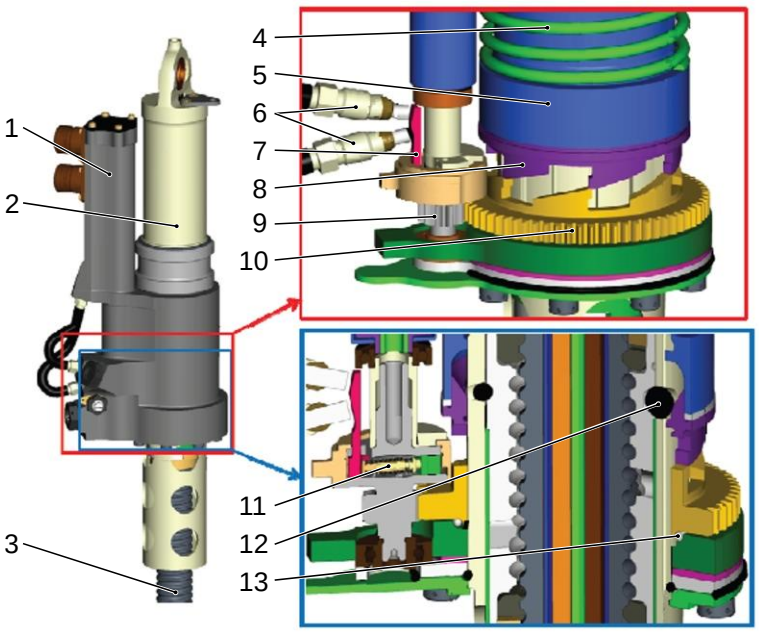
Bild 2.8: Klemmtoleranter elektromechanischer Aktor mit rotierenden Sperrscheiben nach [US8336818B2]

Als Sperrkörper sind zwei Sperrplatten axial im Ausgangskolben gelagert, die, wie die Kugelgewindemutter, mehrere Aussparungen und Absätze aufweisen. Im geschlossenen Kupplungszustand wird der axiale Kraftfluss des elektromechanischen Aktors über diese Absätze geleitet. Als Kupplungsantrieb ist eine Elektromotor-Getriebe-Einheit installiert, mit deren Abtriebswelle die beiden Sperrplatten über Verzahnungen gleichzeitig in gegenläufiger Richtung gedreht werden können. Das Unterbinden des axialen Kraftflusses erfolgt, indem die Absätze der Sperrplatten in die Aussparungen der Kugelgewindemutter rotiert werden.

Der in [DE102009016797A1] beschriebene klemmtolerante elektromechanische Aktor stellt ein Lösungskonzept für die Primärflugsteuerung von Hubschraubern dar, die im Rahmen des europäisch geförderten HEMAS Projekts (siehe [CLEANSKY12]) entwickelt wird und in Bild 2.5 c) skizziert ist. Dabei sind für das Entkuppeln des Antriebsstrangs eine Wellenkupplung, zwei Kugelgewindemuttern und eine extralange Kugelgewinde-

spindel vorgesehen. Im Normalbetrieb des Aktors wird die Kugelgewindespindel mit Hilfe der Elektromotoren und dem Getriebe angetrieben, um den Ausgangskolben zusammen mit der oberen Kugelgewindemutter zu verschieben. Die untere Kugelgewindemutter ist ebenfalls auf der Kugelgewindespindel montiert, im Aktorgehäuse axial gelagert und über die Wellenkupplung mit dem Getrieberad verbunden. Ist die Wellenkupplung geschlossen, rotiert die untere Kugelgewindemutter synchron mit dem Getrieberad, sodass keine relative Translation zwischen der unteren Kugelgewindemutter und der -spindel auftritt. Der axiale Kraftfluss des elektromechanischen Aktors verläuft über den gegen Verdrehen gesicherten Ausgangskolben, die obere Kugelgewindemutter, die Kugelgewindespindel, die untere Kugelgewindemutter, die Axiallagerung der unteren Kugelgewindemutter, das Aktorgehäuse und die Gelenke des elektromechanischen Aktors. Klemmt beispielsweise die obere Kugelgewindemutter, wird mittels der Wellenkupplung der relative Rotationsfreiheitsgrad zwischen der unteren Kugelgewindemutter und dem Getrieberad geöffnet. Da die Wellen-Naben-Verbindung zwischen Getrieberad und Kugelgewindespindel axial verschiebbar ist und der Kugelgewindetrieb keine Selbsthemmung aufweist, ist die relative Translation zwischen der unteren Kugelgewindemutter und der Kugelgewindespindel freigeschaltet und der elektromechanische Aktor entkoppelt. Die in [DE102009016797A1] beschriebene Ausführung mit einer momentbetätigten Wellenkupplung und einer Motorbremse kann je nach Problemstellung auf eine Variante mit einer fremdbetätigten Wellenkupplung und ohne Motorbremse angepasst werden. Um den vollständigen Aktorhub auch nach entkoppeltem Antriebsstrang zu gewährleisten, muss erstens die Spindellänge mindestens den doppelten Aktorhub aufweisen und zweitens zusätzlicher Freiraum mit der Länge eines Aktorhubs unterhalb der Kugelgewindespindel vorgesehen werden. Demzufolge handelt es sich bei diesem Konzept um einen „3 x Hub“-Aktor, der relativ lang baut.

In [BILDSTEIN14] ist eine vorläufige Version der im HEMAS-Projekt umgesetzten Kupplung veröffentlicht. Im gekoppelten Zustand übertragen Sperrkugeln, wie in Bild 2.9 dargestellt, den Kraftfluss zwischen Ausgangskolben und Kugelgewindetrieb und stützen sich radial an der axial verschiebbaren Sperrhülse ab.



1 Elektromotoren inkl. Planetengetriebe
2 Ausgangskolben
3 Kugelgewindetrieb
4 Schraubenfeder
5 Haltering
6 Näherungsschalter
7 Sicherungshebel
8 Sperrhülse
9 Ritzel
10 Sägezahnring
11 Arretierung
12 Sperrkugeln
13 Lagerung des Sägezahnrings

Bild 2.9: Klemmtoleranter elektromechanischer Aktor in Anlehnung an [BILDSTEIN14]

Kleine Absätze an den Sägezähnen von Sägezahnring und Sperrhülse halten letztere dabei in obiger Position. Zur Betätigung der Kupplung sind redundante Elektromotoren, ein Planetengetriebe und eine Stirnradstufe installiert, deren ungewolltes Verdrehen mit Hilfe eines Sicherungshebels und einer kraftschlüssigen Arretierung unterdrückt wird. Das Entkuppeln erfolgt durch Bestromung der Elektromotoren, sodass zum einen die kraftschlüssige Arretierung überwunden und zum anderen der Sägezahnring um wenige Grad von oben betrachtet im Uhrzeigersinn gedreht wird. Sobald die kleinen Absätze von Sägezahnring und Sperrhülse sich nicht mehr berühren, schiebt die vorgespannte Schraubenfeder den Haltering inklusive Sperrhülse axial nach unten. Die Sperrhülse ist in dieser Position so gestaltet, dass auf den elektromechanischen Aktor wirkende Axialkräfte die Sperrkugeln nach außen schieben können, wo sie vom vorgespannten Haltering fixiert werden. Um die Kupplung im Rahmen eines Vorflugtests wieder einzukuppeln, wird der Sägezahnring weiter im Uhrzeigersinn verdreht und die Sperrhülse über die Sägezähne nach oben geschoben, bis der Mechanismus zurückgesetzt ist. Das Rücksetzen der kraftschlüssigen Arretierung erfolgt über eine kurzzeitige Bestromung der Elektromotoren in entgegengesetzter Richtung. Gekoppelter und entkoppelter Kupplungszustand werden über Näherungsschalter am Sicherungshebel überwacht.

Die Anwendung, für die der in [EP2112402A1] (siehe Bild 2.10) beschriebene EMA entwickelt wurde, erfordert im Klemmfall ein Freischalten der Ausfahrbewegung, wobei das Freischalten der Einfahrbewegung für diese Problemstellung nicht gefordert ist.

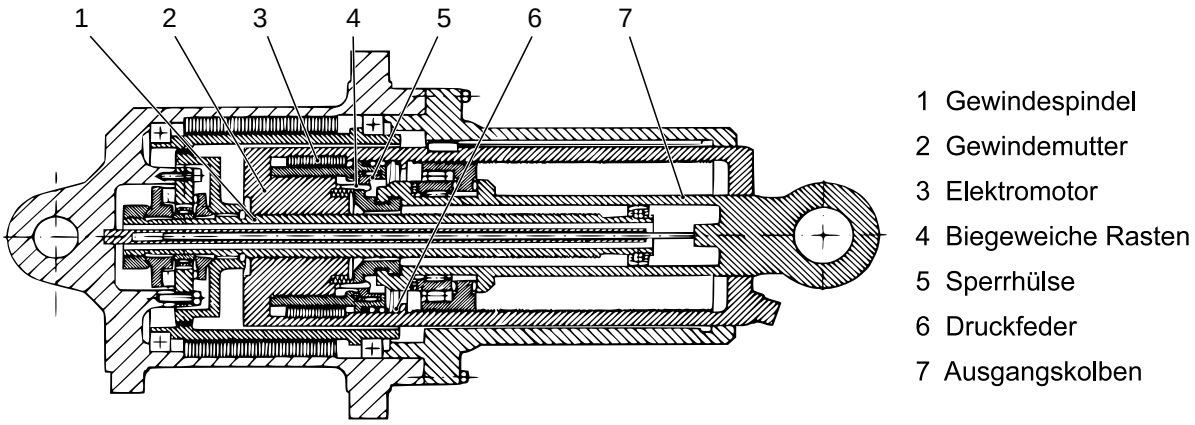


Bild 2.10: Klemmtoleranter elektromechanischer Aktor mit biegeweichen Rasten nach [EP2112402A1]

Hierfür ist eine fremdbetätigte Linearkupplung in Form der Bauteile 3 bis 6 zwischen Gewindemutter und Ausgangskolben eingebaut, die den axialen Kraftfluss im geschlossenen Kupplungszustand über biegeweiche Rasten leitet. Diese sind an der Gewindemutter montiert und werden mit Hilfe einer Sperrhülse in Position gehalten. Zum Entkuppeln des Antriebsstrangs wird der Elektromotor bestromt, dessen Stator mit der Gewindemutter befestigt ist und dessen Rotor über ein separates Gewinde geführt wird. Letzterer führt somit eine kombinierte Dreh- und Linearbewegung relativ zur Gewindemutter aus und verschiebt die Sperrhülse derart, dass die Biegung der Rasten in radialer Richtung freigängig wird. Von außen am Ausgangskolben angreifende Zugkräfte und zusätzliche Schraubenfederkräfte sorgen für die Ausgangskolbenbewegung aus der Arretierung. Die fremdbetätigte Kupplung kann mit Hilfe des installierten Elektromotors und der Kraft einer Schraubenfeder zurückgesetzt werden. Im entkoppelten Zustand der Kupplung wird die Verschiebung des Ausgangskolbens zusätzlich gedämpft bzw. gebremst. Dieser klemmtolerante elektromechanische Aktor kann für die Bugfahrwerksaktorik verwendet werden, wie sie in [CHEVALIER10] beschrieben ist.

Der elektromechanische Aktor in [JIMÉNEZ12] ist analog zur vorherigen Konstruktion für die Bugfahrwerksanwendung vorgesehen, bei der nur die Freischaltung der Ausfahrbewegung im Fall eines klemmenden Antriebsstrangs gefordert ist (siehe Bild 2.11).

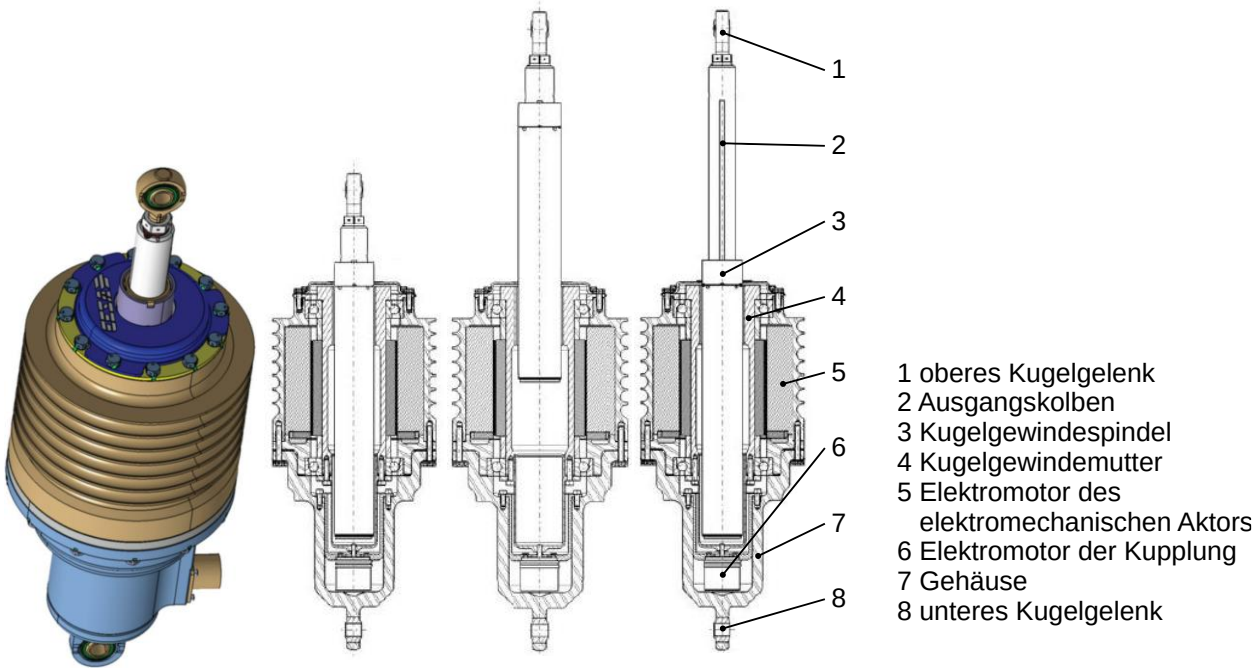


Bild 2.11: Klemmtoleranter elektromechanischer Aktor mit fettgeschmierten Sperrkörpern nach [JIMÉNEZ12], links: CAD-Modell, rechts: Skizze zum eingefahrenen Zustand a), zum ausgefahrenen Zustand im Normalbetrieb b) und zum ausgefahrenen Zustand im Notbetrieb c)

Die als Direktantrieb bezeichnete Konfiguration beinhaltet einen direkt mit der Kugelgewindemutter verbundenen Elektromotor und eine linear bewegte Kugelgewindespindel. Relativ zu ihr lässt sich der Ausgangskolben teleskopartig verfahren, wobei im Normalbetrieb des Aktors der axiale Kraftfluss zwischen diesen beiden Bauteilen über eine Kupplung übertragen wird. Zur Betätigung der Kupplung ist ein weiterer Elektromotor (28 V, 50 W) fest im Inneren des Aktorgehäuses montiert, dessen Schaltenergie mit Hilfe mechanischer Komponenten zu den fettgeschmierten Sperrkörpern der Kupplung geleitet wird. Bei der vorgesehenen Anwendung zieht die Schwerkraft des Bugfahrwerks den Ausgangskolben in seine ausgefahrene Position. Diese Konstruktion stellt eine vollständig reversible Lösung der Kupplung dar, mit der Antriebsstränge bei Vorspannkräften von bis zu 15 kN innerhalb 2 Sekunden entkoppelt werden können.

In [US7834494B1] und [US20090193915A1] werden Ansätze von trennbaren Gewindetrieben beschrieben, bei denen das Entkuppeln direkt an den Wälzkörpern des Kugel- bzw. Rollengewindetriebs stattfindet. Dabei weist das Konzept in [US7834494B1] eine aus mehreren Teilen bestehende Gewindemutter auf. Diese können je nach Bedarf zusammengehalten oder voneinander getrennt werden. Das Konzept in [US20090193915A1] arbeitet dagegen mit einer zusätzlichen Hülse um die Kugelge-

windemutter. Diese beiden Bauteile sind derart gestaltet, dass die Wälzkörper entweder zur Kugelgewindespindel gedrückt oder von dieser fern gehalten werden.

Im Rahmen des HEMAS-Projekts wurden weitere Konzepte in [EP2193286B1] und in [DE102011118240A1] veröffentlicht. Das erste Konzept in [EP2193286B1] basiert auf einem Elektromotor, der direkt einen Kugelgewindetrieb antreibt und in einem rohrförmigen Gehäuse eingebaut ist. Zwischen diesem Gehäuse und dem Stator des Elektromotors befindet sich eine Sicherheitskupplung, die bei Überschreitung einer Drehmomentgrenze den Elektromotor mit dem Gewindetrieb linear freigibt und das Gleiten der entkoppelten Bauteile innerhalb des Gehäuses ermöglicht. Das zweite Konzept in [DE102011118240A1] umfasst einen mechanischen Lösemechanismus, dessen Sperrkugeln federnd gelagert sind und sich aktiv über ein Getrieberad schalten lassen.

2.4 Fremdbetätigte Wellenkupplungen

Im allgemeinen Maschinenbau erfüllen fremdbetätigte Wellenkupplungen das angesteuerte Trennen bzw. Verbinden von rotierenden Antriebsstrangkomponenten. Diese Maschinenelemente lassen sich anhand der folgenden Merkmale klassifizieren:

- Betätigungsart
- Schaltprinzip
- Prinzip der Kraftübertragung

Neben hand- und fußgesteuerter Betätigung haben sich nach [GROTE07, S. G 67] aufgrund einfacher Automatisierung vorwiegend elektromagnetische, pneumatische und hydraulische Antriebe zum Schalten von Wellenkupplungen durchgesetzt. Je nach Anwendung können sich alternative Betätigungseinheiten eignen. Beispielsweise bietet der Hersteller von dem in [RATHKE11] beschriebenen Doppelkupplungssystem sowohl elektrohydraulische als auch elektromechanische Betätigungsvarianten an. Forschungsarbeiten nach [MELZ15] reichen zudem bis hin zu Kupplungsaktoren auf Basis von Formgedächtnislegierungen, bei denen das Schalten temperaturbedingt erfolgt.

Die Klassifizierung nach dem Schaltprinzip beschreibt den Kupplungszustand bei eingeschalteter Aktorik. Während schließende Wellenkupplungen die Drehmomente übertragen, führen öffnende Wellenkupplungen zu einem freilaufenden Antriebsstrang. Bei ausgeschalteter Aktorik stellt sich jeweils der entsprechend andere Kupplungszustand ein. In Analogie hierzu schließen bzw. öffnen fremdbetätigte Linearkupplungen Kraftflüsse von linear bewegten Antriebssträngen. Wie in Kapitel 3.2.10 näher beschrie-

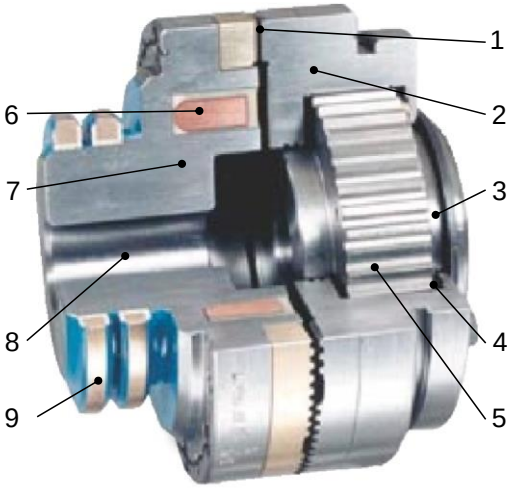
ben, sind die erforderlichen Neukonstruktionen mit öffnendem Schaltprinzip auszustatten.

Fremdbetätigte Wellenkupplungen lassen sich nach [VDI2240] in form- und kraftschlüssige Kupplungen einteilen. Neben den formschlüssigen Ausführungsvarianten stehen auch die reibschlüssigen im Fokus dieser Recherche. Die Differenzierung der Kraftübertragung gilt analog für Linearkupplungen.

Für den Formschluss kommen Klauen, Verzahnungen und andere Elemente, wie Ziehkeile nach [HABERHAUER14, S.139f], in Betracht[1]. Je nach Ausführungsvariante lassen sich mit diesen Maschinenelementen Antriebsstränge bei Stillstand oder synchronem Lauf einkuppeln und teilweise unter Last im laufenden Betrieb entkuppeln. Weiterführend werden Zahnkupplungen ohne und mit Vorsynchronisierung beschrieben.

2.4.1 Zahnkupplung ohne Vorsynchronisierung

Bild 2.12 zeigt eine elektromagnetisch betätigte Zahnkupplung mit Stirnverzahnung (1) ohne Vorsynchronisierung. Während Schraubenfedern (4) die Kupplungen wie im dargestellten Zustand geöffnet halten, ist zum Einkuppeln die Spule (6) des Elektromagneten zu bestromen.



1 Stirnverzahnungen
2 Anker
3 Flansch bzw. Nabe (abtriebsseitig)
4 zylindrische Schraubenfedern
5 bewegliche Welle-Nabe-Verbindung
6 Spule
7 Spulenkörper
8 Eingangsnabe (antriebsseitig)
9 Schleifringe

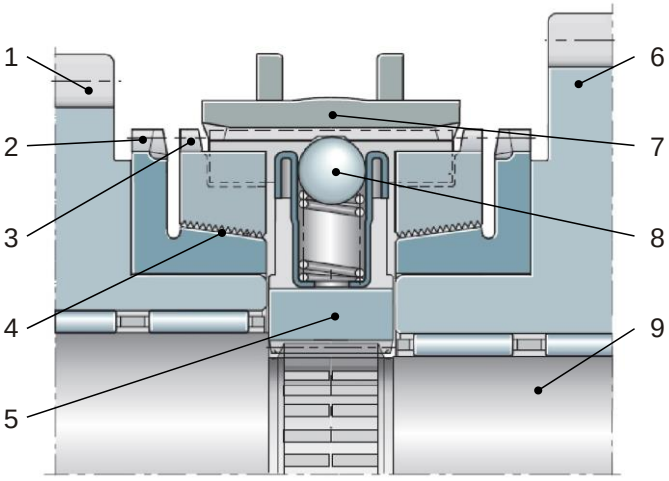
Bild 2.12: Elektromagnetisch betätigte Zahnkupplung mit Schleifringen nach [STROMAG16]

[1] Ferner werden bei drehmomentbetätigten Wellenkupplungen häufig Sperrkugeln zur Kraftübertragung verwendet. Auf eine detaillierte Beschreibung dieser Gruppen von Kupplungen wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

Mittels Stirnverzahnungen lassen sich kurze Schaltwege und kleine Kräfte zum Schließen der Kupplungen realisieren, die gut zu den Stellwegen und Reluktanzkräften der Elektromagnete passen. In Bild 2.12 ist eine Ausführungsvariante mit antriebsseitig mitrotierender Spule (4) und Schleifringen (9) zur elektrischen Energieübertragung dargestellt. Weitere Ausführungsvarianten mit Steckverbinder und stillstehender Spule sind beispielsweise in [STROMAG16] und [ORTLINGHAUS04] beschrieben.

2.4.2 Zahnkupplung mit Vorsynchronisierung

Sind rotierende Bauteile im laufenden Betrieb miteinander formschlüssig zu verbinden, eignen sich Synchronisationssysteme zum Angleichen von Drehzahldifferenzen. Als Beispiel aus dem Getriebebau veranschaulicht Bild 2.13 eine Zahnkupplung mit Einkonus-Sperrsynchronisation in geöffneter Position.



1 linkes Zahnrad
2 Kupplungskörper mit Schaltverzahnung
3 Synchonring mit Schaltverzahnung
4 Reibflächen zur Vorsynchronisation
5 Synchronträger-Körper
6 rechtes Zahnrad
7 Schiebemuffe mit Sperrverzahnung
8 federvorgespanntes Druckstück
9 Antriebswelle

Bild 2.13: Zahnkupplungen mit Einkonus-Sperrsynchronisation nach [SCHAEFFLER06]

Je nach gewünschter Getriebeübersetzung lässt sich die Antriebswelle (9) inklusive fest montiertem Synchronträger-Körper (5) mit einem der Zahnräder (1) oder (6) verbinden. Das Einkuppeln beginnt mit dem Verschieben der Schiebemuffe (7) in Richtung des einzukoppelnden Zahnrades. Durch diese Bewegung werden die im Synchronträger-Körper (5) sitzenden Druckstücke (8) mitgenommen und gegen den Synchronring (3) gepresst. Drehen Antriebswelle (9) und Zahnrad (1) bzw. (6) mit unterschiedlichen Drehzahlen, führt das erzeugte Reibmoment an den Reibflächen (4) des Synchronrings und des auf dem Zahnrad sitzenden Kupplungskörpers zur Vorsynchronisation. Mit weiterführendem Verschieben der Schaltmuffe (7) trifft die Sperrzahnung auf die Schaltverzahnung des Synchronrings (3). In dieser Position werden die Anpresskräfte auf die Reibflächen (4) erhöht, bis Antriebswelle (9) und Zahnrad (1) bzw. (6) synchron laufen. Wird die Bewegung der Schiebemuffe (7) fortgesetzt, trifft die Sperrverzahnung

auf die Schaltverzahnung des Kupplungskörpers (2), um dort den Formschluss für die gekoppelte Kupplungsposition herzustellen. Diverse weitere Ausführungsvarianten von Synchronisationssystemen sind standardmäßig auf dem Markt erhältlich (siehe [SCHAEFFLER06]).

2.4.3 Einflächenkupplung

Erfolgt die Kraftübertragung mittels Reibschluss, können fremdbetätigte Wellenkupplungen gleichzeitig als Sicherheitskupplungen wirken. Dies bedeutet, dass ab definierten Drehmomenten die Reibbeläge der Kupplungen durchrutschen und Überlastungen auf andere Antriebsstrangkomponenten limitiert werden. Je nach Form und Anzahl der Reibbeläge differenzieren sich diese Ausführungen in Einflächen-, Einscheiben-, Lamellen-, Zylinder- und Kegelkupplungen. Hinsichtlich der Schmierung der Reibbeläge sprechen gute Wärmeabfuhr und geringer Verschleiß für nasslaufende Kupplungen, während hohe Reibungskoeffizienten vor allem trockenlaufende Kupplungen ermöglichen. Standardmäßig werden, z. B. nach [ORTLINGHAUS16], organische Reibbeläge, Papier-, Carbon-, Stahl- und Sinterbeläge mit Stahl oder Gusseisen zu Reibsystemen kombiniert. Einen Ansatz zur Steigerung der Leistungsdichte von Kupplungen bieten laut [ALBERS11] ingenieurkeramische Friktionswerkstoffe, da sie in nasslaufenden Kupplungen aufgrund ihrer hohen mechanischen Belastbarkeit eine Vergrößerung der Nutgeometrie und somit eine Verbesserung des Wärmeübergangs ermöglichen. Ferner eignen sich ingenieurkeramische Friktionswerkstoffe für trockenlaufende Kupplungen, da sie vergleichsweise hohe Reibungszahlen aufweisen und mit hohen Flächenpressungen belastet werden dürfen (siehe [ALBERS04]).

Die Einflächenkupplung weist einen Reibkontakt zur Übertragung des Drehmoments auf (siehe [SCHLECHT07, S. 708f]). Hierzu zeigt Bild 2.14 a) exemplarisch eine elektromagnetisch betätigte, schleifringlose Einflächenkupplung mit schließendem Schaltprinzip, die sich im Wesentlichen aus drei Baugruppen zusammensetzt.

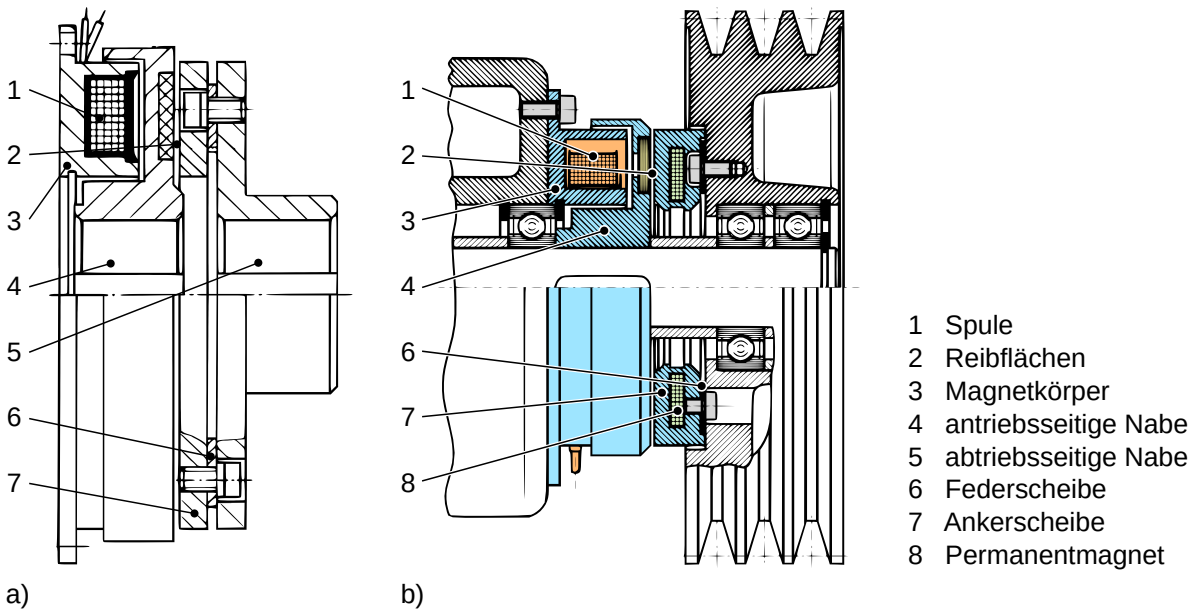


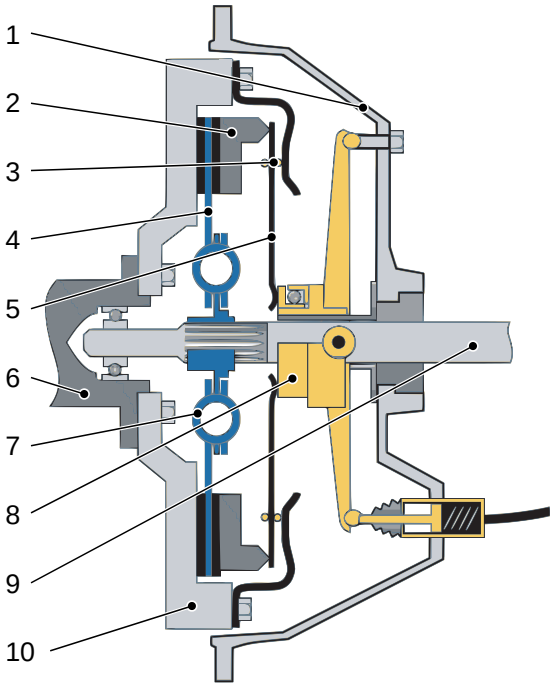
Bild 2.14: Elektromagnetisch betätigte Einflächenkupplungen, a) mit schließendem Schaltprinzip nach [ORTLINGHAUS04], b) mit öffnendem Schaltprinzip nach [KEB15]

Von diesen ist die erste Baugruppe, bestehend aus dem Magnetkörper (3) und der Spule (1), an einem stillstehenden Gehäuse zu befestigen und mit standardisierten Kabeln elektrisch anzuschließen. Die zweite Baugruppe, die mit der Antriebswelle zu verbinden ist, umfasst die antriebsseitige Nabe (4) inklusive des Reibbelags (2). Der mechanische Anschluss zur Abtriebswelle erfolgt über die dritte Baugruppe bestehend aus der abtriebsseitigen Nabe (5), der Ankerscheibe (7) und deren Verbindung über eine Federscheibe (6). Im unbestromten Zustand der Spule hält die Federscheibe (6) die Ankerscheibe (7) an der abtriebsseitigen Nabe (5), sodass kein Drehmoment zwischen An- und Abtriebswelle übertragen wird. Zum Einkuppeln wird die Spule (1) bestromt, welches einen magnetischen Fluss durch die Ankerscheibe (7) erzeugt. Die auftretenden Reluktanzkräfte ziehen die Ankerscheibe (7) an den Reibbelag (2) der antriebsseitigen Nabe und stellen damit eine reibschlüssige Verbindung zwischen An- und Abtriebswelle her. Neben diversen anderen Ausführungsvarianten ist hier die Permanentmagnet-Kupplung, siehe Bild 2.14 b), hervorzuheben, da sie als elektromagnetisch betätigte Einflächenkupplung mit öffnendem Schaltprinzip arbeitet. Als wesentlichen Unterschied im Vergleich zur vorherigen Einflächenkupplung weist die dargestellte Ausführungsvariante nach [KEB15] einen Permanentmagneten (8) in der Ankerscheibe (7) auf, mit dem bei unbestromter Spule (1) ein Magnetfeld induziert und die Ankerscheibe (7) an den Reibbelag (2) der antriebsseitigen Nabe (4) gepresst wird. Um die Kupplung zu öffnen, ist die Spule (1) des Elektromagneten derart zu bestromen,

dass ihr Magnetfeld dem des Permanentmagneten (8) entgegenwirkt und die auf die Ankerscheibe (7) wirkenden Reluktanzkräfte verschwinden. Die mechanischen Kräfte der Federscheibe (6) ziehen die Ankerscheibe (7) in Bild 2.14 b) nach rechts und öffnen den Kontakt an den Reibflächen (2) der Kupplung.

2.4.4 Einscheibenkupplung

Aufgrund ihres Einsatzes bei Personenkraftwagen sind Einscheibenkupplungen weit verbreitet. Mit ihnen wird beim Gangwechsel der Kraftfluss zwischen Kurbelwelle (6) und Getriebewelle (9) unterbrochen, Schwingungen gedämpft und Getriebe ruckfrei an Motoren angeschlossen. Exemplarisch ist in Bild 2.15 eine geschlossene Einscheibenkupplung nach [SACHS12, S. 6] skizziert.



1 Gehäuse
2 Anpressplatte
3 Distanzbolzen & Drahtringe
4 Kupplungsscheibe
5 Membranfeder
6 Kurbelwelle
7 Torsionsdämpfer
8 Ausrücker
9 Getriebewelle
10 Schwungrad

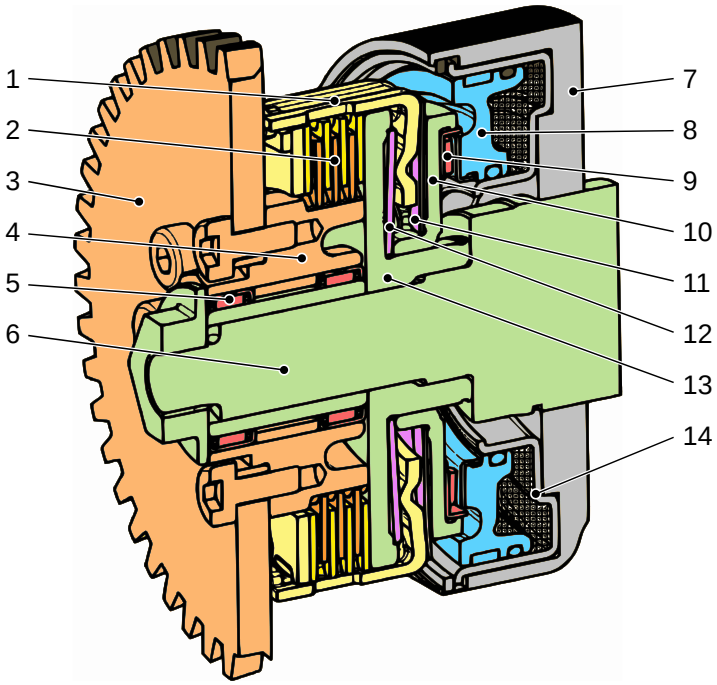
Bild 2.15: Einscheibenkupplung für Personenkraftwagen nach [SACHS12, S. 6]

In dieser Stellung verspannt die Membranfeder (5) die Kupplungsscheibe (4) mit der Anpressplatte (2) und dem Schwungrad (10) und ruft die für den Reibschluss notwendigen Anpresskräfte auf den Reibbelägen der Kupplungsscheibe (4) hervor. Störende Schwingungen im gekoppelten Zustand und während den Schaltvorgängen werden mit Hilfe des Torsionsdämpfers (7) unterdrückt. Zum Entkuppeln bedient der Fahrer das Kupplungspedal, dessen Stellbewegung über eine hydraulische Übersetzung zur Verschiebung des Ausrückers (8) führt (in Bild 2.15 nach links). In dieser Ausführung drückt der Ausrücker (8) auf die Zungenenden der Membranfeder (5), sodass diese um die

Distanzbolzen und Drahtringe (3) kippt und sich die Anpressplatte (2) von der Kupplungsscheibe (4) trennt.

2.4.5 Lamellenkupplung

Durch den Einsatz von mehreren Reibflächen übertragen Lamellenkupplungen im Vergleich zu anderen reibschlüssigen Kupplungen höhere Drehmomente bei kompakten Abmessungen. Kennzeichnend sind die abwechselnd angeordneten Innen- und Außenlamellen (2), die mit dem Innen- (4) bzw. Außenlamellenträger (1) axial beweglich verbunden sind. Hierzu zeigt Bild 2.16 exemplarisch eine pneumatisch betätigte Lamellenkupplung mit öffnendem Schaltprinzip.



1 Außenlamellenträger
2 Innen- und Außenlamellen
3 antriebsseitiges Zahnrad
4 Innenlamellenträger
5 Lagerung
6 abtriebsseitige Welle
7 Gehäuse
8 Kolben
9 Axiallager
10 Betätigungsring
11 Vorlastfeder
12 Klemmfeder
13 Nabe
14 Betätigungszylinder

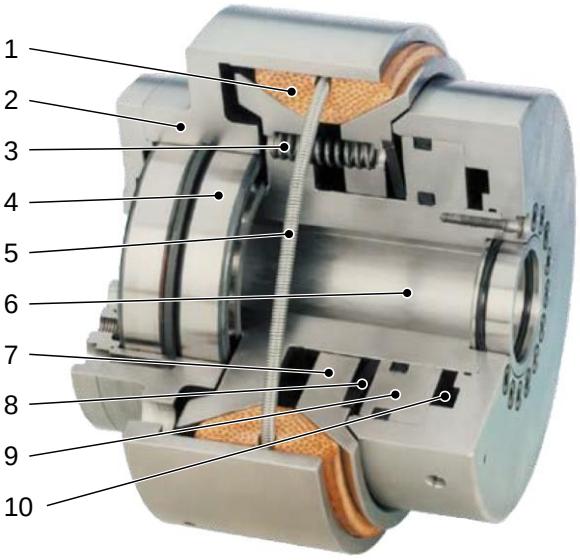
Bild 2.16: Pneumatisch betätigte Lamellenkupplung nach [REICHEL11]

Während das antriebsseitige Zahnrad (3) am Innenlamellenträger (4) angeflanscht ist, steht die abtriebsseitige Welle (6) über die Nabe (13) in Verbindung mit dem Außenlamellenträger (1). In gekoppelter Stellung presst die Klemmfeder (12) über den Außenlamellenträger (1) das Lamellenpaket (2) derart zusammen, dass reibschlüssig Drehmomente zwischen an- und abtriebsseitigen Bauteilen übertragbar sind. Zur Betätigung bilden der fest im Gehäuse (7) integrierte Betätigungszylinder (14) und der axial bewegliche Kolben (8) eine Druckkammer, in die zum Öffnen der Kupplung Druckluft geleitet wird. Die Druckluftzufuhr ist derart ausgelegt, dass die Anpresskraft auf das Lamellenpaket (2) aufgehoben wird und der Kolben (8) eine definierte Stellbewegung ausführt. Die Vorlastfeder (11) sorgt zudem für eine ausreichende Stellbewegung des

Außenlamellenträgers (1) und folglich für ausreichende Spalten zwischen den Lamellen (2).

2.4.6 Kegelkupplung

Als weitere Alternative für das reibschlüssige Übertragen von Drehmomenten eignen sich Kegelkupplungen, wofür beispielhaft in Bild 2.17 nach [DESCH11A] eine hydraulisch betätigte Konstruktion mit schließendem Schaltprinzip dargestellt ist.



1 segmentierter Reibring
2 abtriebsseitiger Flansch
3 Druckfedern
4 Rillenkugellager
5 Zugfeder
6 antriebsseitige Nabe
7 Tellerscheibe
8 Tellerfeder
9 Kolben
10 hydraulische Druckkammer

Bild 2.17: Hydraulisch betätigte Kegelkupplung nach [DESCH11A]

Diese Kupplung ist vor allem durch den segmentierten kegelförmigen Reibring (1) gekennzeichnet. Im geöffneten Kupplungszustand hält die Zugfeder (5) die Segmente des Reibrings (1) zusammen, sodass sich ein ausreichend großer Luftspalt zwischen den Segmenten (1) und dem abtriebsseitigen Flansch (2) bildet und der Drehmomentfluss zwischen An- (6) und Abtriebsseite (2) unterbrochen bleibt. Das Einkuppeln der Kupplung erfolgt, indem die Druckkammer (10) mit Öldruck beaufschlagt und folglich der Kolben (9) über die Tellerfeder (8) gegen die Tellerscheibe (7) gepresst wird. Die axiale Verschiebung der Tellerscheibe (7) und die kegelförmige Geometrie führen dazu, dass die Segmente des Reibrings (1) radial nach außen gedrückt werden und der Reibschluss zwischen An- (6) und Abtriebsseite (2) hergestellt wird. Ferner sind weitere Ausführungsvarianten, wie die beispielsweise mechanisch betätigte Kegelkupplung nach [DESCH11B], auf dem Markt erhältlich.

2.5 Pyrotechnische Technologien in Sicherheitsanwendungen

Insbesondere wegen ihres schnellen Auslösens kommen pyrotechnische Technologien häufig in Sicherheitsanwendungen zum Einsatz. Sie nutzen die in pyrotechnischen

Ladungen gespeicherte chemische Energie, um nach elektrischer Zündung vorwiegend heiße Gase mit hohem Druck zu erzeugen. Je nach Technologie kann beispielsweise der Gasdruck Stellelemente antreiben, Airbags aufblasen oder Gasmotoren bewegen. Im Wesentlichen kristallisieren sich die folgenden Merkmale heraus:

- kompakte und leicht bauende Konstruktionen [LELL13],
- schnelle und robuste Betätigungen [JANG14, COBHAM09] sowie
- niedrige Nichtverfügbarkeiten [LELL14, NAUBERT13A]

Ein bei mehreren Pyromechanismen verwendetes Maschinenelement stellt der Gasgenerator als pyrotechnische Antriebseinheit dar.

Das Bild 2.18 links stellt eine Ausführungsvariante dar, bei der im Gehäuseinneren (3) die pulverförmige Treibladung (5) hermetisch dicht eingeschlossen ist.

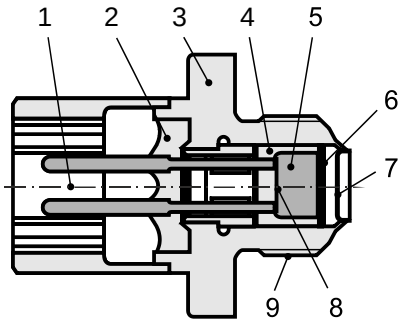


Bild 2.18: Gasgeneratoren; links: GG821 der Firma PyroGlobe (nach [LELL13]), rechts: Skizze zum NASA Standard Initiator in Anlehnung an [BEMENT99]

Als elektrischen Anschluss weist der Gasgenerator einen Steckverbinder (1) auf, an dessen Pinenden zwei sich kreuzende Glühbrücken (8) angelötet sind. Dabei stehen Treibladung (5) und Glühbrücken (8) miteinander in Kontakt. Bei ausreichender Bestromung erhitzen sich die Glühbrücken (8) derart, dass durch den Wärmeübergang die Aktivierungstemperatur der Treibladung (5) überschritten wird. Alternativ können mit besonders hohen Stromstärken die Glühbrücken (8) zum Zerreißen gebracht werden, sodass an den Bruchstellen Lichtbögen entstehen und die chemische Reaktion aktiviert wird, siehe [SILVERMAN08]. Ausgangsseitig durchstößt das erzeugte Gas die Abdeckung (7) des Gasgenerators, sodass es an die angrenzende Baugruppe weitergeleitet wird. Bei Bedarf kann die Verfügbarkeit der elektrischen Stromkreise mittels Messströmen weit unterhalb des Aktivierungsstroms getestet werden (siehe [LELL13]).

Diverse Pyromechanismen, wie beispielsweise der Pinpuller nach [BEMENT95, S. 34ff] in Bild 2.19, basieren auf standardisierten Gasgeneratoren.

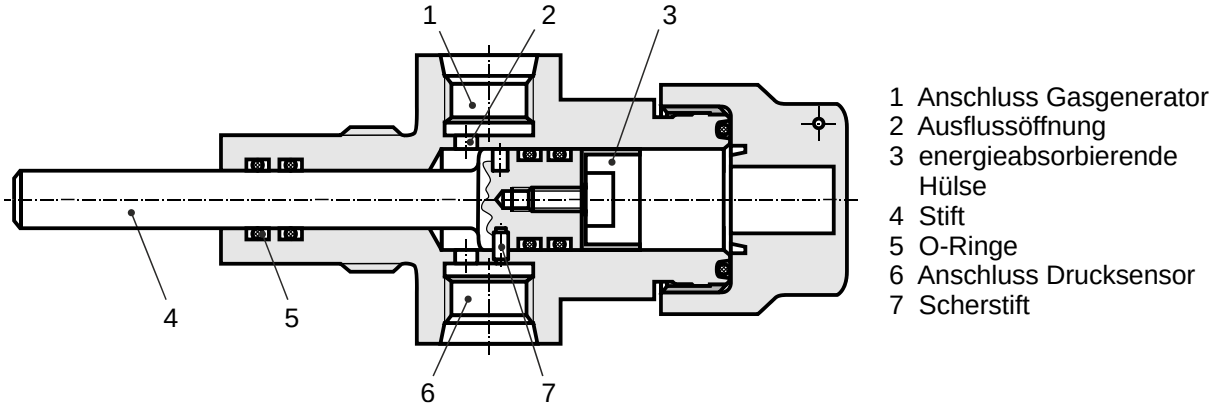


Bild 2.19: Skizze zum pyrotechnischen Aktor in Anlehnung an [BEMENT95]

Hierbei stellen pyrotechnische Aktoren eine Gruppe von Systemen dar, die mit Hilfe des Gasdrucks je nach Ausführungsvariante das Ein- oder Ausfahren von Metallbolzen bewirken. Nach [LELL05] lassen sich mit diesen Stellbewegungen Notausstiege für Fahrzeuge oder Entriegelungen ausklappbarer Strukturen, wie die Überrollbügel von Cabriolets nach [AUDI07] und der Sperrkugelmechanismus nach [CHANG02], realisieren.

Eine weitere Gruppe von Schutzsystemen sind pyrotechnisch betätigte Schneideeinrichtungen. Ihr Ziel ist das Beschleunigen von Schneideklingen, um Bolzen oder Seile durchzutrennen. Eines dieser im Notfall zu trennenden Stahlseile verbindet Transporthubschrauber mit ihren Außenlasten. Verfängt sich die Fracht ungünstiger Weise in der Umgebung, kann sie beispielsweise mittels der Schneideeinheit nach [COBHAM09] (siehe Bild 2.20 links) vom Hubschrauber getrennt und ein Abstürzen des Luftfahrzeugs vermieden werden.

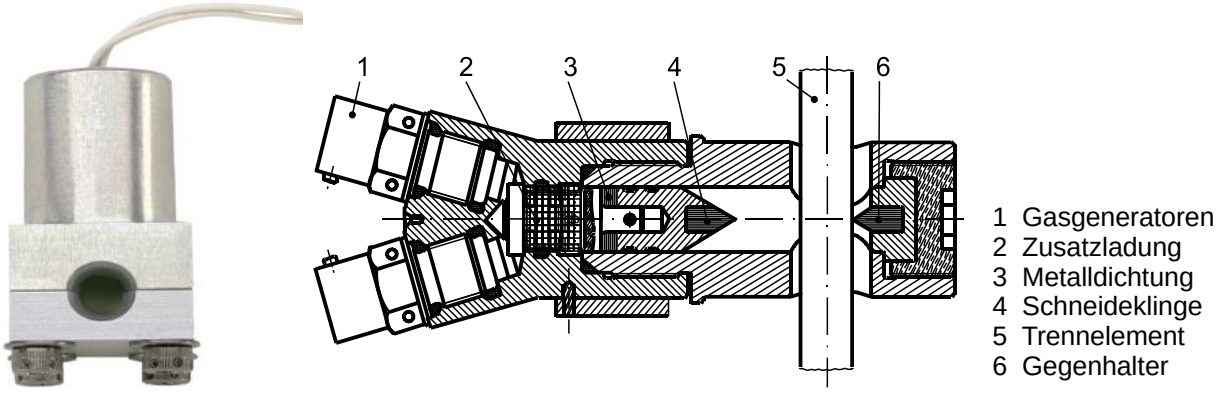
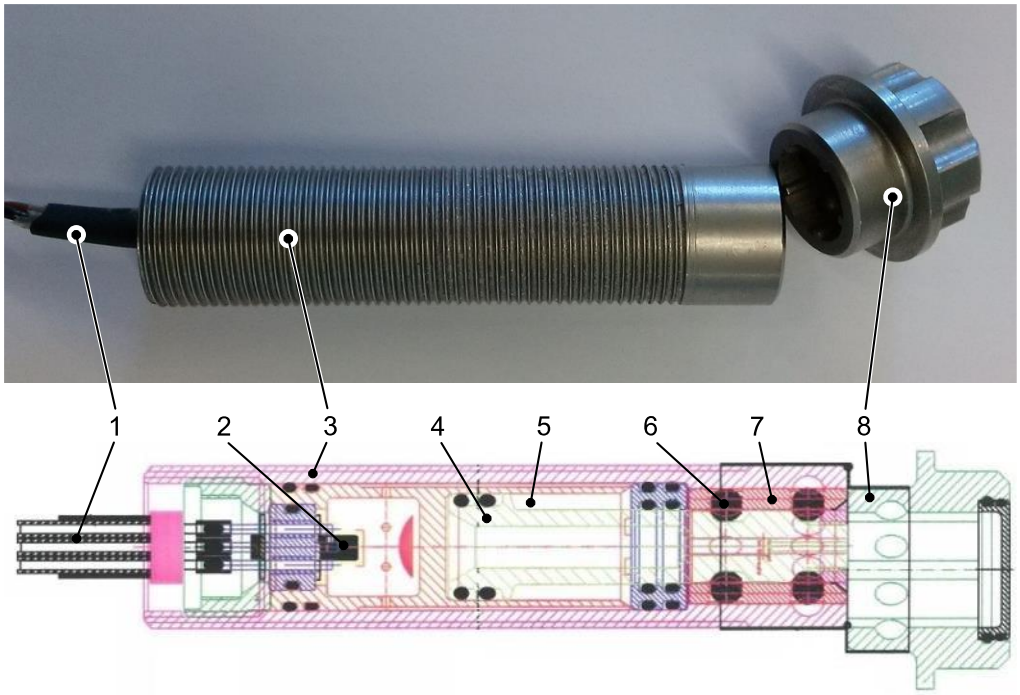


Bild 2.20: Pyrotechnisch betätigte Schneideeinrichtungen; links: Schneideeinrichtung nach [COBHAM09], rechts: Schneideeinrichtung nach [BERNELIN08]

Nach [HOLLAND08] eignen sich Gasgeneratoren zudem auch zur Aktivierung flüssiger Löschmittel von hybriden Feuerlöschsystemen. Im beschriebenen Beispiel weist der Gasgenerator zwei Festtreibstoffstufen auf, von denen die leicht zündfähige Vorstufe

elektrisch initiiert wird. Darauf folgend setzen ihre heißen Gase die chemische Reaktion der Hauptstufe in Gang. Die erzeugten Gase werden über Düsen kontrolliert in den Behälter mit dem flüssigen Löschmittel geleitet, um es durchzumischen, aufzuheizen und mit Druck zu beaufschlagen. Nach Überschreiten des Dampfdrucks verdampft die Flüssigkeit und ist fortan zum Löschen des Feuers bereit. Hybride Feuerlöschsysteme, wie in [HOLLAND08] beschrieben, kommen beispielsweise bei Flugzeugturbinen zum Einsatz.

Ferner ist in Bild 2.21 die pyrotechnische Trennschraube TS14x1 der Firma PyroGlobe GmbH dargestellt.



1 elektrischer Anschluss
2 Treibsatz
3 Schraubenschaft
4 Stellachse
5 Druckkammer
6 Sperrkugeln
7 Kugelkäfig
8 Schraubenkopf

Bild 2.21: Pyrotechnisch betätigte Trennschraube TS14x1 mit intern freischaltbarer Mechanik im getrennten Zustand

Im Normalbetrieb, d. h. vor der Aktivierung des Treibsatzes (2), wird sie als Schraubenverbindung zum Befestigen von Bauteilen verwendet. Ihr Schraubenschaft (3) und -kopf (8) sind hohlgebohrt und durch eine intern freischaltbare Mechanik miteinander verbunden. Dabei leiten Sperrkugeln (6) seitens des Schraubenschafts (3) und Schraubenkopfs (8) den Kraft- und Momentenfluss der Schraubenverbindung. Schaltbar wird der Mechanismus durch die innere Stellachse (4), an der sich im Normalbetrieb die Sperrkugeln (6) radial abstützen. Nach elektrischer Zündung der Treibladung (2) führt

der erzeugte Gasdruck zur Bewegung der inneren Stellachse (4). Sowohl der Kugelkäfig (7) als auch die Sperrkugeln (6) vom Schraubenkopf (8) werden mitgezogen und komplett im Schraubenschaft (3) versenkt. Es folgt ein frei verschiebbarer bzw. abnehmbarer Schraubenkopf (8). Hauptanwendungsgebiet dieser Trennschrauben sind Scharniere an Fahrzeugflügeltüren, die aus Sicherheitsgründen nach einem kritischen Unfall zu trennen sind.

Im Unterschied zur Trennschraube TS14x1 sind Sprengbolzen und -muttern derart konstruiert, dass nach Zündung der innen liegenden Treibladung die tragende Struktur durch den generierten Gasdruck an Sollbruchstellen in mehrere Teile zerbricht. Nach [McGowen05, S. 170] werden beispielsweise Sprengbolzen als Schutzsystem zwischen den Hubschrauberrotorblättern und dem Rotorschaft eingebaut. Während im Normalbetrieb des Hubschraubers die Sprengbolzen Kräfte übertragen, müssen im Notfall vor einem Pilotenausstieg per Schleudersitz die Rotorblätter vom Hubschrauber getrennt werden.

Im Bereich der Forschung zielt das Projekt PYROTAK [Dübbelde08, Leonhardt12] auf die Entwicklung rotatorischer Antriebssysteme mit pyrotechnischen Treibladungen ab (siehe Bild 2.22).

Bild 2.22: Versuchsaufbau des Notöffnungssystems für Türen [Leonhardt12]

Kennzeichnend ist die Funktionsweise der entwickelten Produkte, bei denen je nach Ausführungsvariante die erzeugten Gase der Treibladungen als Arbeitsmittel für Gasmotoren oder Turbinen mit Getrieben verwendet werden. Im Bereich der Pyrotechnik gewinnt die Forschergruppe Erkenntnisse über relativ langsam agierende Systeme. Diese Antriebssysteme stellen eine Alternative zu bestehenden elektrischen bzw.

pneumatischen Notöffnungssystemen für Flugzeugtüren dar, um Kosten und Gewicht zu reduzieren.

Ähnlich den Airbag-Gasgeneratoren und Hybridgasgeneratoren für Fahrzeuge, siehe [AUDI07, AUDI12], werden Evakuierungsrutschen des derzeit größten Passagierflugzeugs A380 ebenfalls mit Hilfe von Gasgeneratoren aufgeblasen. Je Evakuierungsrutsche wird nach Zündung der Treibladung das durch die chemische Reaktion erzeugte Gas mit dem in einem Drucktank gespeicherten Gas gemischt, bevor es, wie in [HUBER07] beschrieben, als Füllmittel zum Einsatz kommt. Anspruchsvolle Forderungen vor allem hinsichtlich des Aufblaszeitintervalls, des Bauraums und des Gewichts führen dazu, dass sich pyrotechnische Evakuierungsrutschen für A380-Flugzeuge gegenüber pneumatischen Alternativen durchgesetzt haben.

2.6 Defizite und Folgerungen für diese Arbeit

Elektromechanische Flugsteuerungssysteme, bei denen eine hohe Betriebssicherheit gefordert ist, benötigen Sicherheitselemente zur Kompensation von kritischen Fehlerfällen. Wohingegen doppelte Lastpfade nur begrenzt gegen manche Fehlerfälle wirken - beispielsweise kann die in [WHITE09] beschriebene Hülse nach einem Spindelbruch die zuletzt angesteuerte Position des Aktors halten -, ermöglichen doppelte Antriebspfade die vollständige Fortsetzung der Steuerfunktion auch nach den Fehlern eines freilaufenden oder klemmenden Antriebsstrangs. In [CHRISTMANN10] werden die Konfigurationen „Serial“ (drei seriell angeordnete Aktorpaare), „Parallel“ (drei parallel angeordnete Aktorpaare mit je einer Taumelscheibenanbindung pro Paar) und „Grouped“ (drei parallel angeordnete Aktorpaare mit je einer Taumelscheibenanbindung pro Aktor) anhand der gewichteten Bewertungskriterien Masse, Bauraum, Technologierisiko und Komplexität miteinander verglichen (siehe Bild 2.23). Da die Konfiguration „Grouped“ insbesondere bei den Kriterien Masse, Bauraum und Komplexität hoch punktet und relativ zu den anderen beiden Lösungen am besten abschneidet, wird in dieser Arbeit von Kundenseite ein System mit fremdbetätigter Kupplung vorgegeben.

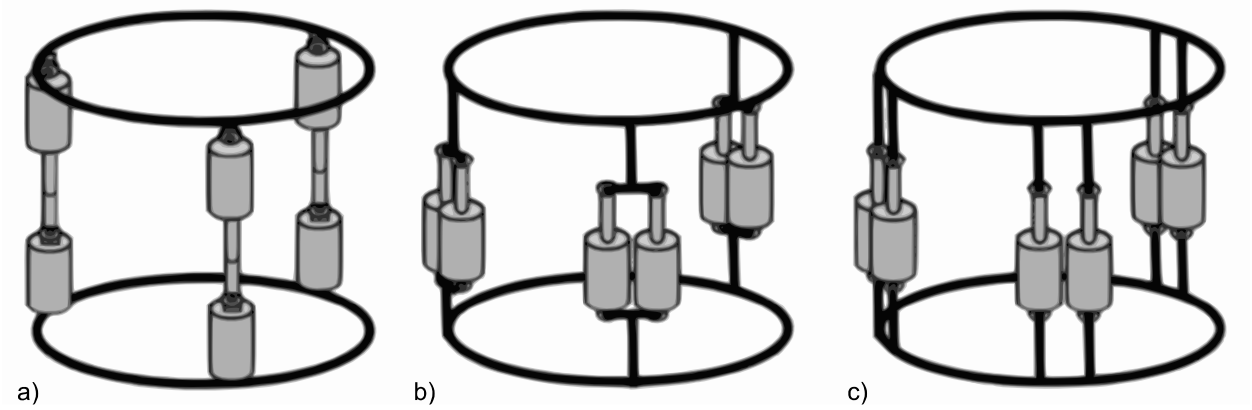


Bild 2.23: Konfigurationen: „Serial“ a), „Parallel“ b) und „Grouped“ c) [CHRISTMANN10]

Konzepte mit fremdbetätigten Wellenkupplungen, die das Klemmen eines Gewindetriebs berücksichtigen, erfordern gravierende Änderungen der umliegenden Antriebsstrangkomponenten und führen zum Verfehlen der Bauraum- und Gewichtsanforderungen bezüglich des vorliegenden Anwendungsfalls. Des Weiteren besitzen die Konzepte mit fremdbetätigten Wellenkupplungen vergleichsweise große Trägheiten und erfordern den Reversierbetrieb des Gewindetriebs im geöffneten Kupplungszustand. Diese Nachteile weisen fremdbetätigte Linearkupplung nicht auf, wenn sie nahe an der Abtriebsseite platziert sind.

Die beschriebenen klemmtoleranten elektromechanischen Aktoren beinhalten auch neuentwickelte fremdbetätigte Kupplungen. Sie sind jedoch für spezielle Anwendungen entworfen und lassen sich bis auf das Konzept in [BILDSTEIN14] aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen nicht direkt auf die primäre Flugsteuerung für Hubschrauber übertragen. Bei der letztgenannten Ausführungsvariante besteht Optimierungspotenzial hinsichtlich der Reduktion der Bauteilanzahl, des kompakteren Gestaltens der Baugruppe, der Reduktion der Kupplungsmasse, der Verkürzung der Schaltzeit und des robusten Schaltens bei hohen Belastungen.

Trennbare Gewindetriebe, bei denen das Entkuppeln direkt an den Wälzkörpern des Gewindetriebs erfolgt, sind jedoch hinsichtlich klemmtoleranter elektromechanischer Aktoren für die Primärflugsteuerung kritisch zu betrachten, da die potentiellen Klemmfälle des Gewindetriebs mit Hilfe der Kupplung ebenso abzudecken sind. Tritt solch ein Fehlerfall auf, kann gerade die einwandfreie Funktion der Kupplung nicht mehr garantiert werden, sodass diese Konzepte auszuschließen sind.

Ferner lassen sich die Eigenschaftsmerkmale von fremdbetätigten Wellenkupplungen auf die zu entwickelnden Linearkupplungen übertragen und weiter bezüglich der Anwendung eingrenzen. Hinsichtlich der Betätigungsart kommen zunächst alle

Kupplungsantriebe in Frage, sofern sie die Anforderungen insbesondere zur Schaltzeit und zu den Umgebungstemperaturen einhalten. Im Kontext des „More Electric Aircraft"-Ansatzes stehen jedoch vorwiegend elektrische Betätigungsarten im Fokus dieser Arbeit. Da Linearkupplungen im Normalbetrieb geschlossen und nur im Fall eines klemmenden Antriebsstrangs sowie gegebenenfalls während automatisierter Vorflugversuche zu öffnen sind, weisen Linearkupplungen vorzugsweise ein öffnendes Schaltprinzip auf.

Die Übersicht bezüglich der pyrotechnischen Technologien in Sicherheitsanwendungen liefert zudem eine Auswahlmöglichkeit für die Betätigung der irreversiblen Linearkupplung und offenbart deren spezifische Eigenschaften. Einerseits sind mit derartigen Kupplungsbetätigungen kompakte Leichtbaukonstruktionen, kurze Schaltzeiten und Baugruppen mit wenigen Bauteilen realisierbar, andererseits ist ihre Selbsttestfähigkeit limitiert.

Als Schlussfolgerung der dargestellten Recherche zeichnet sich eine Lücke bezüglich passender Kupplungen für die primäre Flugsteuerung von Hubschraubern ab. Dies bezieht sich insbesondere auf die Konzepte mit Wellenkupplungen, bei denen die anderen Antriebsstrangkomponenten stark beeinflusst werden. Kundenspezifische Linearkupplungen für elektromechanische Aktoren sind zwar teilweise für spezielle Anwendungen verfügbar, sie stellen jedoch Sonderlösungen dar und lassen sich derzeit nicht adäquat bei Steuerungssystemen für Hubschrauber einsetzen. Hinsichtlich irreversibler Lösungen sind im Wesentlichen pyrotechnische Betätigungselemente erhältlich, wobei bei dieser Technologie eine Kombination mit Schaltelementen zu einer fremdbetätigten Linearkupplung aktuell nicht existiert.

2.7 Konkretisierung der Zielsetzung

Basierend auf dem dargestellten Stand der Technik und Forschung wird in diesem Kapitel die Zielsetzung dieser Arbeit konkretisiert. Das Hauptziel besteht in der Entwicklung neuer Linearkupplungen, mit denen klemmende Antriebsstränge von elektromechanischen Aktoren schnell entkoppelt werden können (siehe Kapitel 3.1). Weiterhin wird die Entwicklung von fremdbetätigten Linearkupplungen in reversibler und irreversibler Ausführung verfolgt.

Der wesentliche Vorteil von reversiblen Lösungen ist die Funktionalität, alle Kupplungskomponenten vor dem Flug automatisiert unter Last zu testen und anschließend zurückzusetzen. Diese Funktionalität erfordert im Allgemeinen relativ komplexe und

schwere Baugruppen, sodass bei der Entwicklung der reversiblen Varianten insbesondere auf Leichtbau und eine geringe Anzahl von Bauteilen zu achten ist. Ferner sind die Lösungen auf den konkreten Anwendungsfall und auf die anderen Antriebsstrangkomponenten abzustimmen. Um diese Ziele zu erreichen, sind innovative Lösungen zu erarbeiten.

Mit irreversiblen Ausführungen können häufig wesentlich einfachere und leichtere Baugruppen realisiert werden. Sie eignen sich insbesondere aufgrund ihrer hohen Leistungsdichte, die sie mittels eines Energiespeichers im Bedarfsfall schnell zur Verfügung stellen. Das einmalige Auslösen ist jedoch ihr Nachteil, da im regulären Flugbetrieb die Funktion der Linearkupplungen nicht vollständig überprüft werden kann. Folglich sind die nicht testbaren Komponenten insbesondere die Schaltelemente der irreversiblen Linearkupplungen gering und ausfallsicher zu halten. Die grundlegende Entwicklung einer geeigneten Kombination von einer irreversiblen Betätigungseinheit mit Schaltelementen ist deshalb von entscheidender Bedeutung. Ferner können sich irreversible Lösungen nur durchsetzen, wenn ihre Vorteile hinsichtlich des Leichtbaus, des geringen Bauraums und des schnellen und robusten Schaltens überwiegen.

3 Planen und Klären der Aufgabe

Nach der Aufbereitung des Standes der Technik und Forschung folgt die Phase des Planens und Klärens der Aufgabe. Insbesondere werden hier alle wesentlichen Anforderungen zu den fremdbetätigten Linearkupplungen definiert.

3.1 Konkretisierung der Aufgabenstellung

Diese Arbeit basiert auf parallel angeordneten Aktoren, deren Antriebsstränge aufgrund der geforderten Betriebssicherheit mit Sicherheitselementen auszustatten sind. Für kraftsummierende Flugsteuerungskonzepte eignen sich fremdbetätigte Linearkupplungen, deren Entwicklung im Fokus dieser Arbeit steht. Die Funktion dieser Kupplungen besteht darin, klemmende Antriebsstränge freizuschalten, sodass der Flug mit den verbleibenden Primärflugsteuerungsaktoren zumindest in eingeschränkter Betriebsweise fortgesetzt werden kann.

3.2 Anforderungen

3.2.1 Art der abzudeckenden Fehler

Als mögliche Klemmstellen sind alle Maschinenelemente mit wälzenden Kontakten, insbesondere Gewindetriebe, Wälzlager und Zahnradgetriebe zu berücksichtigen. Diverse Schadensmechanismen, wie z. B. der Bruch eines Lagerkäfigs, können bei diesen Maschinenelementen direkt zum Klemmen des Antriebsstrangs führen. Andere Schadensmechanismen, wie z. B. die Werkstoffermüdung eines Wälzkörpers, schränken zunächst die Leistungsfähigkeit des Maschinenelements ein. Bei weiterführendem Betrieb ist im Allgemeinen mit der Entstehung von Bruchstücken zu rechnen, die ebenso mechanisches Klemmen verursachen können. Da bei der konkreten Anwendung der Flug nach einem mechanischen Fehler kontinuierlich zu steuern ist, sind zuletzt genannte Schadensmechanismen ebenfalls von den zu entwickelnden Linearkupplungen abzudecken. Übersichten zu Schadensmechanismen und -ursachen der genannten Maschinenelemente sind unter anderem in [SCHAEFFLER15, 706ff; NIEMANN03, 123ff; NSK16; SAEAIR5713] dokumentiert. Ein klemmender Kolben ist hingegen nicht zu berücksichtigen, da dieser Fehlerfall als zu unwahrscheinlich eingestuft wird. Diese Annahme basiert darauf, dass hydraulische Primärflugsteuerungsaktoren ähnliche Kolben besitzen und im Serienbetrieb klemmende Kolben dort unkritisch sind.

3.2.2 Maximal zulässige Schaltzeit

Im Betrieb der Primärflugsteuerung erfolgt die Detektion des mechanischen Klemmens mittels eines Überwachungssystems, dessen Entscheidung auf diversen Sensorsignalen basiert. Um fehlerhafte Sensorsignale auszuschließen und den ausgefallenen Antriebsstrang von den funktionierenden eindeutig zu identifizieren, sind mehrere Messwerte zu unterschiedlichen Zeitpunkten notwendig. Hierfür vergeht vom Auftreten des Klemmens bis hin zur sicheren Detektion die sogenannte Detektionszeit. Unmittelbar danach beginnt der Schaltvorgang mit der Bestromung der entsprechenden Kupplungsaktorik. Wegen der geforderten Betriebssicherheit sind für die Kupplungsaktorik zwei redundante Stromkreise vorzusehen, damit die Entkoppelungsvorgänge durch zwei unabhängige Signale ausgelöst werden. Kennzeichnend für das Schaltvorgangsende ist das Öffnen des Kraftflusses. Das Zeitintervall dazwischen wird als Schaltzeit bezeichnet und im Rahmen dieser Entwicklungsarbeit mit dem maximal zulässigen Wert $t_{S,max}$ = 50 ms spezifiziert (siehe [NAUBERT14B, S. 52ff]). Bleiben Detektionszeit und Schaltzeit innerhalb der zulässigen Werte, werden kritische Fehler ausreichend schnell behoben und kritische Flugsituationen in sichere überführt.

3.2.3 Dynamische Belastungen

Eine wesentliche Herausforderung bei der Entwicklung von Primärflugsteuerungsaktoren spiegelt sich in der spezifizierten Aktordynamik wider. Zu deren Beschreibung steht ein von den Hubschrauberherstellern bereitgestelltes Referenzflugprofil zur Verfügung, das sich auf drei standardmäßig verwendete Hydraulikaktoren bezieht und aus mehreren Flugmanövern wie u. a. Reiseflug und Limitmanöver zusammensetzt (siehe [NAUBERT14B, S. 52ff]). Jedem dieser Flugmanöver sind eine Zeitdauer, eine von außen angreifende Maximalkraft, eine von außen angreifende Minimalkraft und Sollpositionen zugeordnet. Wie in Bild 3.1 skizziert, oszilliert die am Aktor angreifende Kraft F_{ext} zwischen den angegebenen Kraftwerten mit einer für alle Flugmanöver gleichen Drehfrequenz.

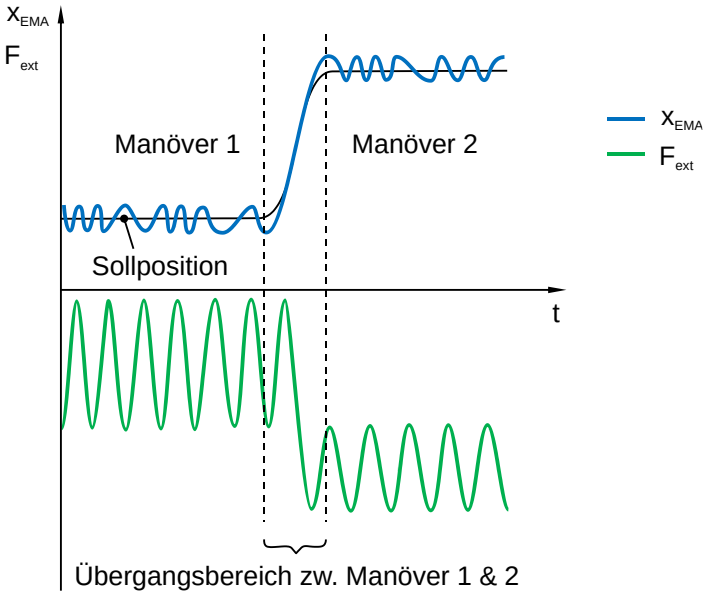


Bild 3.1: Qualitativer Verlauf von zwei Flugmanövern des Referenzflugprofils

Als Bestandteil des Antriebsstrangs müssen die zu entwickelnden Linearkupplungen im geschlossenen Zustand daher hämmernde Lasten übertragen, was an stillstehenden Elementen elastische Verformungen hervorrufen und Schwingungsverschleiß bewirken könnte. Entsprechende Gegenmaßnahmen hierzu sind bei der Entwicklung zu berücksichtigen. Während eines Flugmanövers ist jedem der drei Flugsteuerungsaktoren eine bestimmte Sollposition zugeordnet, um die der Stellweg des Aktors x_{EMA} infolge von Systemrauschen schwingt. Die dazugehörigen Frequenzen und Amplituden sind aufgrund vorhandener Messdaten bekannt. Je nach Kupplungskonzept und Position im Antriebsstrang können sich Kupplungsbauteile im bewegten Teilsystem des elektromechanischen Aktors befinden. Sie werden somit auch im geschlossenen Zustand mit den Stellwegen verschoben. Zu beachten ist, dass die gegebenen Referenzflugprofilwerte des hydraulischen Steuerungssystems in Abhängigkeit von den Redundanzen der elektromechanischen Steuerungssysteme nach [CHRISTMANN10] anzupassen sind. Bei der Steuerung von redundanten Systemen sind zudem geringe Kraftüberhöhungen aufgrund ungleichmäßiger Kraftverteilungen zu berücksichtigen. Als konservative Anhaltswerte hierfür dienen die nach [COCHOY06] in Abhängigkeit vom Regelkonzept ermittelten Kraftüberhöhungen von etwa 7 % der Lastgrenze.

3.2.4 Statische Belastungen

Neben den dynamischen Belastungen werden Festigkeitsanforderungen nach [FARPART25, S. 35] mit Lastgrenzen und Bruchlastgrenzen spezifiziert. Mit F_{limit} = ±50 kN beschreiben die geforderten Lastgrenzen die maximal im Betrieb erwarte-

ten Kräfte auf den elektromechanischen Aktor (siehe [NAUBERT14B, S. 52ff]). Dies deckt alle wesentlichen Fehler einschließlich des Antriebsstrangklemmens ab, wobei die daraus resultierenden Bauteilverformungen den sicheren Betrieb nicht gefährden und keine schädlichen plastischen Verformungen auftreten dürfen. Zudem schränken die Lastgrenzen die Bandbreite der Vorspannkräfte auf die Kupplung ein, bei denen die Kupplungsaktorik schalten können muss. Da höhere Vorspannkräfte während des Klemmens im Allgemeinen höhere Betätigungskräfte für das Entkuppeln zur Folge haben, stellen die Lastgrenzen entscheidende Größen bei der Auslegung der Kupplungsaktorik dar. Unerwartete Belastungen werden durch die spezifizierten Bruchlastgrenzen berücksichtigt, die mit dem 1,5-fachen der Lastgrenzen spezifiziert sind und für den statischen Festigkeitsnachweis mindestens 3 Sekunden lang gehalten werden müssen. Während plastische Bauteilverformungen mit unbedeutenden Auswirkungen hier toleriert werden, sind Bauteilbrüche bzw. Bruchstücke nicht zugelassen.

3.2.5 Maximal zulässige Masse der Linearkupplung

Als übergeordnetes Ziel setzen die Konzepte der elektromechanischen Flugsteuerung bei dem direkten Austausch des hydraulischen Referenzsystems an. Um attraktive Alternativen darzustellen, sind Gewichtsanforderungen auf Systemebene und folglich auf Komponentenebene zu erfüllen. Generell korrelieren Leichtbauweisen in der Luftfahrt mit einem niedrigen Kraftstoffverbrauch, geringen Antriebsleistungen für die jeweiligen Flugmanöver und einem kleinen Gewichtsverhältnis von Transportmittel zu Fracht. Grundlage für die maximal zulässige Linearkupplungsmasse von $m_K = 2$ kg (siehe [NAUBERT14B, S. 52ff]) sind die Massenabschätzungen in [CHRISTMANN10], die im Vergleich mit der Masse des hydraulischen Referenzsystems angegeben werden. Je nach Kupplungskonzept sind gegebenenfalls Modifikationen anderer Antriebsstrangkomponenten erforderlich, deren Massen teilweise erheblich beeinflusst werden können. Um einen adäquaten Vergleich aller Kupplungskonzepte zu ermöglichen, ist die Kupplungsmasse aus der Massendifferenz zwischen einem elektromechanischen Aktor mit Kupplung und einem elektromechanischen Aktor ohne Kupplung zu ermitteln. Aus Systemsicht entscheidet die Gesamtmasse der primären Flugsteuerung.

3.2.6 Umgebungstemperaturen

Häufig stellen harte Umgebungsbedingungen wesentliche Herausforderungen bei der Entwicklung von Luftfahrtsystemen dar. Zugehörige Mindestprüfbedingungen und Testverfahren für technische Systeme von gängigen Luftfahrtzeugen sind hierfür in der

Norm RTCA DO160-F [RTCA07] zusammengefasst. Zur Definition der Betriebstemperaturen werden technische Systeme nach [RTCA07, S. 21ff] zuerst einer Kategorie zugewiesen. Dabei fallen die zu entwickelnden Linearkupplungen in Kategorie B4, da sie in einer Zone ohne Druck- und Temperaturregelung außen am Luftfahrzeug mit maximaler Flughöhe von 25.000 ft installiert sind und zudem die Temperaturanforderungen von denen der Kategorien B1 und B2 abweichen. Letzteres rechtfertigt sich durch heiße Triebwerksabgase, die die Linearkupplungen zusätzlich thermisch beanspruchen.

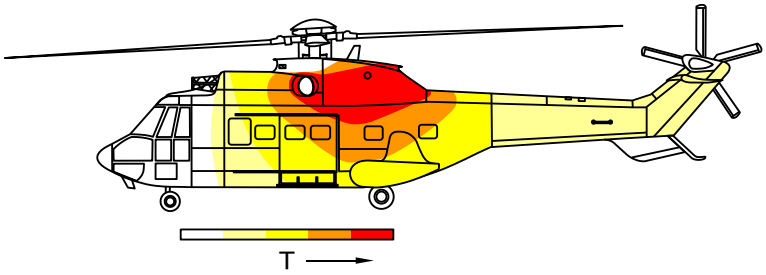


Bild 3.2: Qualitativer Verlauf der maximalen Betriebstemperaturen am Referenzhubschrauber auf Basis von [WIKIPEDIA17]

Hierzu zeigt Bild 3.2 qualitativ die maximalen Betriebstemperaturen am Referenzhubschrauber. Für die Kategorie B4 sind nach [RTCA07, S. 21ff] die Betriebstemperaturen mit den Systemherstellern zu vereinbaren, was zu Temperaturen von -45 °C bis +180 °C führt. Neben den Betriebstemperaturen sind Notfalltemperaturen, die z. B. im Fall eines Getriebeölbrands entstehen können, zu berücksichtigen. Trotz gegebenenfalls installierter Feuerschutzmaßnahmen werden Temperaturen von +300 °C für 15 min erwartet, bei denen die Kupplungen keinesfalls ungewollt entkuppeln dürfen und noch funktionstüchtig sein sollen (siehe [NAUBERT14B, S. 52ff]). Insbesondere bei der Entwicklung von Pyromechanismen ist daher die Wahl geeigneter Treibladungen entscheidend.

Analog zu den Betriebstemperaturen lassen sich weitere Umgebungsbedingungen mit Hilfe der Norm RTCA DO160-F spezifizieren. Entsprechende Angaben sind in der Anforderungsliste, siehe Tabelle 3.1, aufgeführt.

3.2.7 Minimalsteifigkeit der Linearkupplung

Als Bestandteil des Antriebsstrangs muss die Linearkupplung die von den Hubschrauberherstellern geforderten mechanischen Eigenschaften an den Primärflugsteuerungsaktor erfüllen. Eine dieser Eigenschaften bezieht sich auf die statische Minimalsteifigkeit des Antriebsstrangs, mit der ein sicherer Rotorbetrieb des Hubschraubers gewährleistet

wird. Im Wesentlichen bilden die zu bewegenden Trägheiten, die Elastizitäten und dämpfenden Eigenschaften des Antriebsstrangs, die am Aktor angreifenden Kräfte F_{ext} und die Antriebskräfte ein schwingfähiges System. Dabei stellt die Minimalsteifigkeit des Antriebsstrangs die Grundlage für weitere Dynamikanforderungen an den Primärflugsteuerungsaktor dar, wie z. B. spezifizierte Sprungantworten. Nach der Vorauslegung der Antriebsstrangkomponenten inklusive Steifigkeitsberechnungen lässt sich die Anforderung an die Minimalsteifigkeit der Linearkupplung zu R_{min} = 320 kN/mm ermitteln (siehe [NAUBERT14B, S. 52ff]).

3.2.8 Maximal zulässiges Axialspiel

Eine weitere spezifizierte Eigenschaft des Primärflugsteuerungsaktors bezieht sich auf das maximal zulässige Axialspiel im Antriebsstrang. Diese Anforderung hängt mit dem Einfluss auf die Regelbarkeit des Flugsteuerungssystems zusammen, da das Axialspiel eine Nichtlinearität in der Stellgröße darstellt. Zudem wird erwartet, dass ein zu großes Axialspiel die Verschleißraten der sich im Kraftfluss befindenden Komponenten zu schnell, gegebenenfalls bis zum Ausfall des Aktors, ansteigen lässt. Dies stützt sich auf Erfahrungswissen der Hubschrauberhersteller zu Kugelgelenken, die aktuell standardmäßig bei den hydraulischen Primärflugsteuerungsaktoren verwendet werden. Ähnlich wie bei der statischen Minimalsteifigkeit lässt sich nach Vorauslegung der Antriebsstrangkomponenten das maximal zulässige Axialspiel der Linearkupplung zu $\Delta x_{ax,max}$ = 0,05 mm festlegen (siehe [NAUBERT14B, S. 52ff]). Diese Anforderung sowie die in der Vorauslegung getroffenen Werte beziehen sich auf die komplette Gebrauchsdauer des Primärflugsteuerungsaktors.

3.2.9 Maximal zulässige Herstellkosten

Als wesentliche betriebswirtschaftliche Größe werden die Herstellkosten für den Serieneinsatz zu HK = 2.500 € bezüglich einer Produktion von 600 Stück pro Jahr spezifiziert (siehe [NAUBERT14B, S. 52ff]). Dies beinhaltet alle wiederkehrenden Kosten zur Herstellung einer Linearkupplung, wie beispielsweise die Materialkosten, die Kosten für die Benutzung von Werkzeugmaschinen, die Personalkosten der Werkstatt und die Preise von Zukaufteilen. Ausgenommen sind die Entwicklungskosten, da diese im Rahmen des EU-geförderten Programms FASTDISC finanziert werden. Als Grundlage für diese Forderung dienen Erfahrungswerte von ähnlichen Luftfahrtprodukten und Abschätzungen anhand vorhandener Prototypen.

3.2.10 Anforderungsliste

Tabelle 3.1 fasst alle relevanten Anforderungen bezüglich der Linearkupplung für elektromechanische Primärflugsteuerungsaktoren von Hubschraubern zusammen (siehe [NAUBERT14B, S. 52ff]).

F W	Nr.	Anforderungen Forderung (F), Wunsch (W)	Quantifizierung, Beschreibung
	1	**Geometrie**	
F	1.1	Integration der Linearkupplung in den Antriebsstrang des elektromechanischen Aktors	
W	1.2	Die beiden Kugelgewindetriebe K1 und K2 sind als Arbeitsannahme zu verwenden: – Nenndurchmesser d_0, – Außendurchmesser des Kugelmutterkörpers D_1, – Länge der Kugelgewindemutter L, – Steigung P_h, – Bohrungsdurchmesser der Kugelgewindespindel d_{Bohr}.	Para. K1* K2* d_0 27 24 D_1 44 48 L 150 58 P_h 13.8 5-6 d_{Bohr} 17 14 *alle Werte in mm
	2	**Kinematik**	
F	2.1	Die Linearkupplung soll in der Lage sein, einen klemmenden mechanischen Antriebsstrang zu entkuppeln, sodass die redundante Aktorik mindestens in eingeschränkter Betriebsweise den Flug sicher fortführen kann.	
F	2.2	Die maximale Schaltzeit für den Entkoppelungsvorgang $t_{S,max}$ beträgt 50 ms.	$t_{S,max}$ = 50 ms
W	2.3	Der gewünschte Wert für die Schaltzeit t_S liegt bei 20 ms.	$t_{S,max}$ = 20 ms
F	2.4	Der Ausgangskolben des elektromechanischen Aktors bewegt sich mit folgenden dynamischen Kennwerten: – maximale Geschwindigkeit des Ausgangskolbens $v_{max,1}$, – im Normalbetrieb mögliche, transiente Geschwindigkeitsspitzen $v_{max,2}$, – maximale Beschleunigung a_{max}.	 $v_{max,1}$ = 100 mm/s $v_{max,2}$ = 200 mm/s a_{max} = 8 m/s²
	3	**Kräfte**	
F	3.1	Lastgrenze (Druck/Zug) F_{limit} zusammengesetzt aus aerodynamischen Kräften, Gewichtskräften und Kräften durch interne Verspannung des Flugsteuerungssystems	F_{limit} = ±50 kN
F	3.2	Bruchlast (Druck/Zug) $F_{ultimate}$	$F_{ultimate}$ = ±75 kN
F	3.3	Flugprofil für die Lebensdauerauslegung der lasttragenden Kupplungskomponenten, siehe [SHILLITO11]	
F	3.4	Minimale statische Steifigkeit der Linearkupplung R_{min}	R_{min} = 320 kN/mm
F	3.5	Auf die Kugelgewindemutter dürfen keine Querkräfte wirken, um die Laufeigenschaften des Kugelgewindetriebes nicht zu beeinträchtigen.	
F	3.6	Die maximal zulässige Linearkupplungsmasse $m_{K,max}$ beträgt 2 kg.	$m_{K,max}$ = 2 kg
W	3.7	Die gewünschte Linearkupplungsmasse m_K beträgt 1 kg.	$m_{K,max}$ = 1 kg
	4	**Signal**	
W	4.1	Die Linearkupplung wird über eine elektronische Schnittstelle digital oder analog geschaltet. Die vorgeschlagene Konstruktion sollte eine Funktion aufweisen, die bzgl. des Schaltsignals verzögert schaltet, sodass die Linearkupplung erst schaltet, wenn das Schaltsignal für 10 ms oder länger übertragen wird.	

Tabelle 3.1: Auszug aus der Anforderungsliste für die Entwicklung der Linearkupplung

F	4.2	Für die Betätigung der Entkoppelungsvorgänge werden zwei unabhängige Signale gesendet. Die Linearkupplung soll konform mit dieser Spezifikation sein, wenn nur ein oder beide Signale das Entkuppeln veranlassen.	
	5	**Sicherheit**	
F	5.1	Alle wälzenden Maschinenelemente sind als potentielle Klemmstellen zu betrachten. Die Konzepte der Linearkupplung sollen derart gewählt werden, dass alle kritischen Klemmfälle abgedeckt sind. Ausgeschlossen sind alle weiteren Fehler, wie beispielsweise ein klemmender Ausgangskolben. Klemmende Kolben sind nicht zu berücksichtigen.	
F	5.2	Geforderte Fehlerraten für die Fehlermoden „ungewolltes Entkuppeln“ im Normalbetrieb und „Entkoppelungsfehler“ im Bedarfsfall	$\lambda = 10^{-6}$ 1/fh
	6	**Fertigung**	
F	6.1	Maximales Axialspiel der Linearkupplung während ihres Gebrauchs Ein niedrigerer Wert ist wünschenswert.	$\Delta x_{ax,max}$ = 0,05 mm
	7	**Gebrauch**	
F	7.1	Bereich der Umgebungstemperatur T_U	T_U zw. -45 °C und +180 °C
F	7.2	Die Linearkupplung darf bis zu einer oberen Temperaturgrenze $T_{U,max}$ von 300 °C für mindestens 15 Minuten nicht ungewollt auslösen.	$T_{U,max}$ = 300 °C für 15 min kein ungewolltes Auslösen
W	7.3	Die Entkoppelungsfunktion sollte bei Temperaturen zwischen 180 °C und 300 °C für 15 Minuten zur Verfügung stehen.	$T_{U,max}$ = 300 °C für 15 min funktionstüchtig
F	7.4	Maximale Flughöhe für den kontinuierlichen Betrieb h_{max}	h_{max} = 25.000 ft
F	7.5	RTCA/DO-160F: „Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment“. – Section 15: „Magnetic Effect“ – Section 17: „Voltage Spike“ – Section 18: „Audio Frequency Conducted Susceptibility – Power Input“ – Section 19: „Induced Signal Susceptibility“ – Section 20: „Radio Frequency Susceptibility (Radiated and Conducted)“ – Section 21: „Emission of Radio Frequency Energy“ – Section 22: „Lightning Induced Transient Susceptibility“ – Section 25: „Electrostatic Discharge“	
F	7.6	INT/POL/27&29/1: „Protection from the effects of HIRF“ AC 20.158: „The Certification of Aircraft Electrical and Electronic Systems For Operations in The High Intensity Radiated Fields (HIRF) Environment“	
F	7.7	Direkte Blitzschlageffekte: Die Linearkupplung soll nach einem Blitzschlag noch funktionstüchtig sein.	
F	7.8	Vibrationen: Die Linearkupplung soll die Qualifikationsanforderungen DO-160E Section 8, Category R einhalten. Die Frequenzen in Zone 4 (Triebwerk und Getriebe) und die Levels mit den Kurven I und I1 sind zu betrachten. Betriebsbedingte Schocks: – Landung: DO160F/ED14F Kap. 7.2, Kat. D – Unfallsicherheit: DO160F/ED14F Kap. 7.3, Kat. E	

Tabelle 3.1: Auszug aus der Anforderungsliste für die Entwicklung der Linearkupplung (Fortsetzung)

		Konstante Beschleunigung: – Kraftfaktor: alle Achsen +/- 1 g, positive z-Achse 3,5 g für 1 min – Testprozedur: DO160F/ED14F Kap. 7.3.3 Vibrationen: – Weißes Rauschen W0 nach DO160F/ED14F Tabelle 8-2B – DO160F/ED14F Kap. 8 Zone 4/I (Triebwerk und Getriebe) – Im Betrieb – 26,05 Hz Anregung 2,1 g – 40 Hz Anregung 3,2 g – 52,1 Hz Anregung 4,2 g – 83,5 Hz Anregung 6,7 g Lebensdauer: – 26,05 Hz Anregung 4 g – 40 Hz Anregung 4 g – 52,1 Hz Anregung 5,2 g – 83,5 Hz Anregung 8,4 g	
	8	**Instandhaltung**	
F	8.1	Der relevante Wert ist die mittlere Zeitdauer zwischen zwei Ausfällen (MTBF) des elektromechanischen Aktors (10.000 h).	MTBF > 10.000 h
F	8.2	Die mittlere Zeitdauer bis zur planmäßigen Grundinstandsetzung (MTBO) soll mindestens 5.000 h betragen.	MTBO = 5.000 h
W	8.3	Die gewünschte mittlere Zeitdauer für die planmäßige Grundinstandhaltung ist größer als 10.000 h.	MTBO = 10.000 h
W	8.4	Wartungsarm	
W	8.5	Zugänglichkeit der einzelnen Komponenten zur Wartung und Instandhaltung vorsehen	
	9	**Kosten**	
W	9.1	Die maximalen Herstellkosten HK für die Serienproduktion mit ca. 600 Stück pro Jahr	HK = 2.500 €/Stück
	10	**Termin**	
F	10.1	Termin für die ersten Prototypen (Meilenstein M5)	30.01.2015

Tabelle 3.1: Auszug aus der Anforderungsliste für die Entwicklung der Linearkupplung (Fortsetzung)

Mit dieser Anforderungsliste ist die Aufgabe des Produkts präzise formuliert und für folgende Entwicklungsphasen zusammenfassend dokumentiert. Sie wurde während des Produktentstehungsprozesses stets auf dem neuesten Stand gehalten und dient als Grundlage zur Bewertung der erarbeiteten Lösungsalternativen (siehe Kapitel 4.1.4 und 4.2.4).

4 Konzeptphase

Nach der Erarbeitung der Anforderungen folgt in diesem Kapitel das Konzipieren der Linearkupplungen. Diese Phase umfasst im Wesentlichen das Erstellen von Funktionsstrukturen, das Generieren von morphologischen Kästen, die Ableitung von Konzepten und die Bewertung der Konzepte. Aufgrund der unterschiedlichen Wirkungsweisen teilt sich das Kapitel in das Konzipieren der reversiblen Linearkupplungen und in das der irreversiblen Linearkupplungen.

4.1 Reversible fremdbetätigte Linearkupplungen

4.1.1 Funktionsstruktur

Mit der Funktionsstruktur werden wesentliche Eigenschaften der reversiblen fremdbetätigten Linearkupplung auf abstrakter Ebene dargestellt. Hintergrund ist die Erhöhung des Systemverständnisses und die Reduzierung der Komplexität auf handhabbare Teilproblemstellungen (siehe FELDHUSEN13, S. 237ff). Ferner werden mögliche Denkblockaden und Lösungsfixierungen gemindert beziehungsweise gelöst. Lösungsideen aus anderen Bereichen beziehungsweise Disziplinen lassen sich zudem herleiten. Die Funktionsstruktur der reversiblen Linearkupplung ist Grundlage für den im folgenden Kapitel aufgeführten morphologischen Kasten.

Bild 4.1 zeigt die Funktionsstruktur des Gesamtsystems „Reversible Linearkupplung“ und seine Untergliederung in die vier Untersysteme „Steuerung“, „Aktorik“, „Mechanismus“ und „Sensorik“. Da der mechanische Energiefluss mit der wesentlichen Funktion „mechanische Energie leiten / nicht leiten“ (Funktion M2) unmittelbar das Entkuppeln zur Folge hat, stellt dieser den Hauptfluss der Kupplung (Funktionen M1, M2 und M3) dar.

Die Aktivierung des Entkuppelns beginnt über zwei redundante elektrische Energieflüsse, den ersten beiden Nebenflüssen, die nach Kommandierung durch die Steuerungselektronik freigegeben (Funktionen E1 und E2) und anschließend an die Aktoren weitergeleitet werden (Funktionen A1 und A2). Nach der Wandlung in mechanische Energie (Funktionen A4 und A5) können die Flüsse zu einem Fluss verknüpft und je nach Konzept geändert werden (Funktion A7). Schnelle Schaltvorgänge bei kompakter Bauweise zeichnen sich durch die Freigabe von gespeicherter Energie aus (Funktionen A10), die vergleichsweise wesentlich größer ist als ihre entriegelnde mechanische Energie. Diese gespeicherte Energie wirkt als Schaltenergie direkt an den zu

entkuppelnden Schaltelementen, wobei die nicht benötigte Energie absorbiert wird (Funktion M4). Im Rahmen von Vortests erfolgt die Rücksetzung des Energiespeichers über den dritten Nebenfluss (Funktionen E3, A3, A6, A8 und A9), für den aufgrund stark unterschiedlicher Anforderungen zwischen Ent- und Einkoppelungsvorgängen vorzugsweise ein anderer Antrieb zum Einsatz kommt.

Die in Bild 4.1 dargestellte Funktionsstruktur gilt ebenso für eine standardisierte Aktorik, bei der die Energie nach ihrer Wandlung und gegebenenfalls ihrer Änderung direkt als Schaltenergie für Ent- und Einkoppelungsvorgänge zum Einsatz kommt. Bei diesen Konzepten fallen die Funktionen A1 und A2 mit A3, A4 und A5 mit A6 sowie A7 mit A9 zusammen. Zugleich entfallen die Funktionen des Energiespeicherns und Energiehaltens bzw. -freigebens.

Für einen sicheren Betrieb sind die Zustände „gekoppelte Kupplung“ und „entkoppelte Kupplung“ mit Hilfe eines redundanten Sensors zu unterscheiden (Funktion S1).

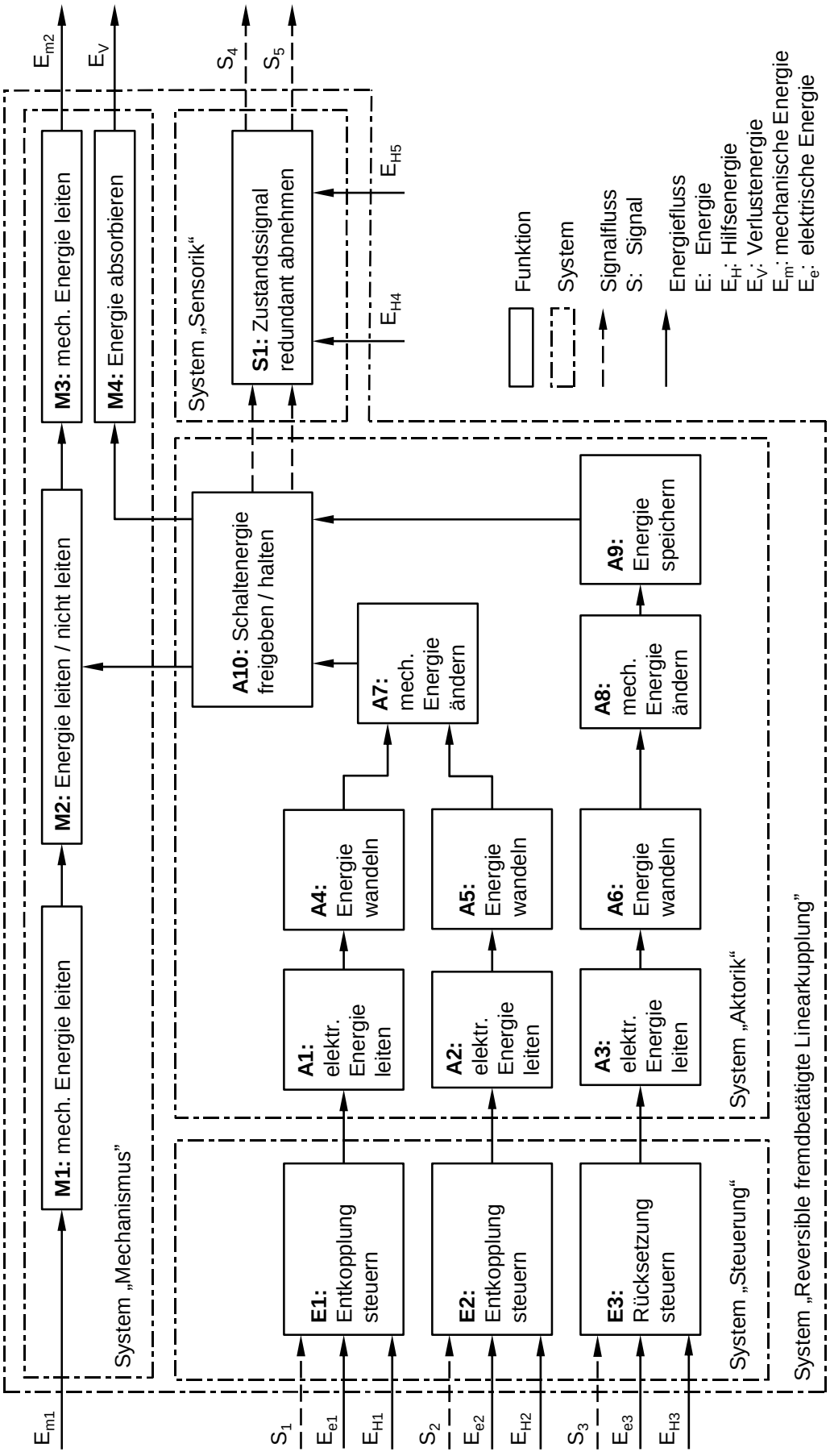


Bild 4.1: Funktionsstruktur für reversible fremdbetätigte Linearkupplungen

4.1.2 Morphologischer Kasten

Ausgehend von der Funktionsstruktur erfolgt die Suche nach Teillösungsideen zu jeder Funktion der reversiblen fremdbetätigten Linearkupplung, wofür recherchierende, diskursive und intuitive Methoden zum Einsatz kommen. Hierzu fließen die mittels Recherchen ermittelten Teillösungsideen aus Kapitel 2 in die Lösungsfindung mit ein. Intuitive Modifikationen, wie sie beispielsweise von den Wellenkupplungen für die gesuchte Linearkupplung hergeleitet werden, ergeben neue Teillösungsideen und erweitern das Lösungsfeld. Des Weiteren stehen bereits dokumentierte Wirkprinzipien, wie sie beispielsweise für die Funktion „Energie speichern“ in [FELDHUSEN13, S. 377] aufgelistet sind, zur Verfügung. Sie werden auf ihre Eignung hinsichtlich der aktuellen Entwicklungsaufgabe geprüft und gegebenenfalls in das Lösungsfeld integriert.

Um einen Überblick über die wesentlichen Teillösungsideen zu bekommen, sind die Wirkprinzipien, die die Teillösungsideen auf erster konkreter Stufe darstellen, im morphologischen Kasten der Tabelle 4.1 geordnet (angelehnt an [NAUBERT14B, S. 10ff]).

M1: mech. Energie leiten	M1.1 Ausgangs-kolben	M1.2 Flanschver-bindung							
M2: Energie leiten / nicht leiten	M2.1 direkt betätigte Stifte	M2.2 entriegelbare Stifte	M2.3 entriegelbare Kugeln	M2.4 Schaltseg-mente	M2.5 Spannhülse	M2.6 Spannbacken	M2.7 Spannele-mente	M2.8 Keilelemente	
M3: mech. Energie leiten	M3.1 Kugelgewinde-mutter	M3.2 Kugelgewinde-spindel	M3.3 Flanschver-bindung						
M4: Energie absorbieren	M4.1 fester Endanschlag	M4.2 Elastomer	M4.3 Schrauben-feder	M4.4 fluidischer Absorber					
E1 / E2: Entkopp-lung steuern	E1.1 Steuerung der Kupplung	K							

Tabelle 4.1: Morphologischer Kasten für reversible Linearkupplungen

E3: Rückseitzung steuern	E3.1 Steuerung der Kupplung	E3.2 Steuerung der EMA							
A1 / A2: elektr. Energie leiten	A1.1 flexibles Kabel	A1.2 flexibles Kabel & Energiekette	A1.3 flexibles Kabel & Faltenbalg	A1.4 Kabel in Nut geführt	A1.5 Rollen	A1.6 Schleifkontakt	A1.7 Lichtwellenlei-tertechnik	A1.8 kontaktlose Übertragung	A1.9 starres Kabel
A3: elektr. Energie leiten	A3.1 Übertrag. des getesteten EMA	A3.2 Kabel des red-undanten EMA	A3.3 Übertrag. Ent-kupplungsaktor	A3.4 Übertragung separater Aktor					
A4 / A5: Energie wandeln	A4.1 Elektromotor	A4.2 Elektromagnet	A4.3 Tauchspulen-motor	A4.4 piezoelektri-scher Aktor	A4.5 magnetostrikti-ver Aktor	A4.6 elektrorheolo-gischer Aktor	A4.7 magnetorheo-logischer Aktor	A4.8 Formgedächt-nislegierung	A4.9 fluidischer Aktor
A6: Energie wandeln	A6.1 Motor des ge-testeten EMA	A6.2 Motor des red-undanten EMA	A6.3 Entkupplungs-aktor	A6.4 separater Aktor					

Tabelle 4.1: Morphologischer Kasten für reversible Linearkupplungen (Fortsetzung)

A7: mech. Energie ändern	A7.1 Hebel	A7.2 Kurbelgetriebe	A7.3 Keil	A7.4 Gewindetrieb	A7.5 Zahnradgetriebe	A7.6 Flaschenzug	A7.7 Kurvengetriebe	A7.8 Spannscheibe	A7.9 Hülltriebe	
	A7.10 Doppelrad	A7.11 hydraulische Übersetzung	A7.12 Kniehebel	A7.13 Zahnstange	A7.14 Reibradgetriebe	A7.15 Kombination	A7.16 keine Energieänderung	-		
A8: mech. Energie ändern	A8.1 Antriebstr. des getesteten EMA	A8.2 Antriebstrang des red. EMA	A8.3 Änderung Entkupplungsaktor	A8.4 Änderung separater Aktor						
			dieselbe wie in A7	analoge Wirkprinzipien wie in A7						
A9: Energie speichern	A9.1 Formänderungsenergie	A9.2 kinetische Energie	A9.3 potentielle Energie / Grav.	A9.4 Batterie	A9.5 Kondensator	A9.6 Permanentmagnet	A9.7 Drucktank	A9.8 Flüssigkeit	A9.9 kein Energiespeicher	-
A10: Schaltenerg. freigeben / halten	A10.1 Verriegelungsmechanismus	A10.2 flexible Membran	A10.3 Kniegelenk	A10.4 gespapelte Kugeln	A10.5 Kurvensteuerung	A10.6 Steilgewinde	A10.7 Kulisenführung	A10.8 kein Mechanismus	-	

Tabelle 4.1: Morphologischer Kasten für reversible Linearkupplungen (Fortsetzung)

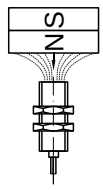
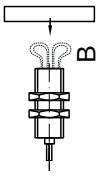
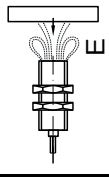
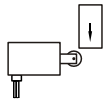
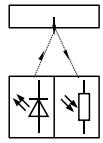
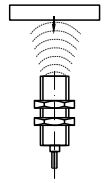
S1: Zustand redundant messen	S1.1	S1.2	S1.3	S1.4	S1.5	S1.6			
	magnetischer Sensor	induktiver Sensor	kapazitiver Sensor	mechanischer Endschalter	optischer Sensor	Ultraschall-Sensor			
									

Tabelle 4.1: Morphologischer Kasten für reversible Linearkupplungen (Fortsetzung)

Auf Basis einer umfassenden Lösungssuche haben sich die in Tabelle 4.2 beschriebenen Wirkprinzipkombinationen als zielführend herausgestellt. Diese wurden zu konkreten Entwürfen ausgearbeitet. Auf die vollständige Darstellung der Lösungssuche wird hier verzichtet.

Variante	Wirkprinzipien														
a)	M1.1	M2.3	M3.3	M4.1	E1.1	E3.1	A1.9	A3.3	A4.1	A6.3	A7.5	A8.3	A9.9	A10.8	S1.2
b)	M1.1	M2.5	M3.1	M4.1	E1.1	E3.1	A1.1	A3.3	A4.2	A6.3	A7.16	A8.3	A9.9	A10.8	S1.3
c)	M1.1	M2.3	M3.1	M4.2	E1.1	E3.2	A1.1	A3.2	A4.2	A6.2	A7.16	A8.2	A9.1	A10.1	S1.1
d)	M1.1	M2.3	M3.1	M4.2	E1.1	E3.2	A1.1	A3.2	A4.1	A6.2	A7.5	A8.2	A9.1	A10.5	S1.2
e)	M1.1	M2.3	M3.1	M4.1	E1.1	E3.1	A1.1	A3.3	A4.1	A6.3	A7.5	A8.3	A9.1	A10.7	S1.1
f)	M1.1	M2.4	M3.1	M4.1	E1.1	E3.1	A1.1	A3.3	A4.1	A6.3	A7.5	A8.3	A9.9	A10.8	S1.1

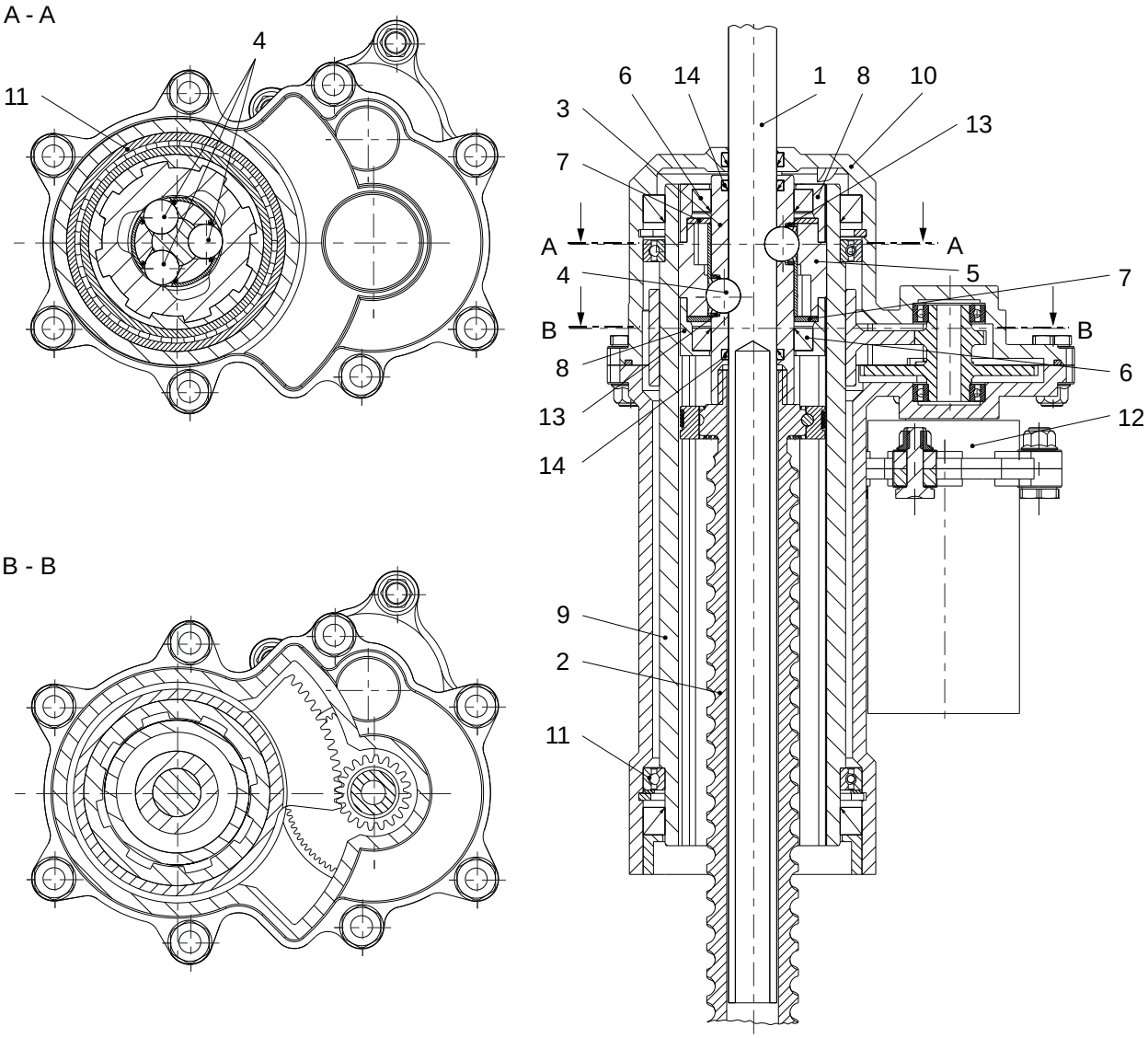
Tabelle 4.2: Kombinationen von Wirkprinzipien zu Gesamtkonzepten der reversiblen fremdbetätigten Linearkupplungen[2]

[2] Die Sensoren zur Funktion „Zustand redundant messen“ sind in den folgenden Konzeptbeschreibungen nicht dargestellt.

4.1.3 Konzeptbeschreibungen

4.1.3.1 Reversible Variante a)

Die reversible Variante a) ist zwischen einer verrückbaren Kugelgewindespindel (2) und einem Ausgangskolben (1) installiert, bei der der Kraftfluss mit Hilfe von Sperrkugeln (4) geschaltet werden kann.



1 Ausgangskolben
2 Kugelgewindespindel
3 Adapter
4 Sperrkugeln
5 Sperrhülse
6 Wellendichtringe
7 Scheiben
8 Deckel
9 Schalthülse
10 Gehäuse
11 Wälzlager
12 Motor-Getriebe-Einheit
13 Halteelemente
14 Stangendichtungen

Bild 4.2: Reversible Variante a) im gekoppelten Zustand

Im gekoppelten Zustand, siehe Bild 4.2, hält eine Sperrhülse (5) die Kugeln (4) in sphärischen Senkbohrungen des Ausgangskolbens (1) und in Durchgangsbohrungen des

Adapters (3) zur Kugelgewindespindel (2). Die Bauteile Sperrhülse (5), Wellendichtringe (6), zwei Scheiben (7) und zwei Deckel (8) sind miteinander zu einer Baugruppe montiert (Presspassungen zwischen den Deckeln und der Sperrhülse) und relativ zum Ausgangskolben (1) drehbar gelagert (Gleitlager zwischen dem Adapter und der Sperrhülse). Zwischen dieser Baugruppe und der Schalthülse (9) sperrt eine axial bewegliche Welle-Nabe-Verbindung den Rotationsfreiheitsgrad und ermöglicht gleichzeitig die lineare Bewegung zwischen diesen Bauteilen, sodass im gekoppelten Zustand der Kupplung die Sperrhülse (5) in der Schalthülse (9) axial gleiten kann. Letztere ist im Gehäuse (10) des elektromechanischen Aktors mit Wälzlagern (11) gelagert und wird mit einer Motor-Getriebe-Einheit (12) angetrieben, um den Mechanismus zu entkoppeln. Beim Kuppeln unter hohen Axiallasten stellt die Haftreibung zwischen Kugeln (4) und Sperrhülse (5) den wesentlichen zu überwindenden Widerstand dar. Die Sperrhülse (5) wird bis an den Endanschlag gedreht. Im Verlauf dieser Bewegung werden die Kugeln (4) durch Taschen in der Sperrhülse (5) radial freigegeben. Äußere Kräfte auf den elektromechanischen Aktor drücken die Kugeln (4) radial nach außen, bis sie durch elastische Halteelemente (13) in der freigeschaltenen Stellung gehalten werden. Im Rahmen von automatisierten Vorflugtests lässt sich der Mechanismus zurücksetzen, indem der redundante elektromechanische Aktor den Ausgangskolben (1) axial so positioniert, dass sich die sphärischen Bohrungen wieder unter den Sperrkugeln (4) befinden. Währenddessen dreht die Motor-Getriebe-Einheit (12) der Kupplung die Sperrhülse (5) zurück, bis die Kugeln (4) wieder in den gekoppelten Zustand gedrückt werden. Da die beabsichtigten Vorflugtests unter Volllast stattfinden sollen und der Verschleiß an den kraftübertragenden Kugeln (4) minimal gehalten werden soll, sieht die in Bild 4.2 dargestellte Ausführungsvariante Schmierstoff an den Sperrkugeln (4) vor. Als Dichtung zwischen Ausgangskolben (1) und Kupplung dienen zwei Stangendichtungen (14), die ihre Funktionen nur bis zu einer bestimmten linearen Bewegung des Ausgangskolbens (1) erfüllen. Bei den automatisierten Vorflugtests soll die Axialbewegung stets kleiner als der durch die Stangendichtungen (14) begrenzende Wert sein. Im Fall eines mechanischen Klemmens darf der Schmierstoff den vorgesehenen Raum nach dem Kuppeln verlassen, da der ausgefallene elektromechanische Aktor ersetzt wird, sobald der Flug beendet ist.

4.1.3.2 Reversible Variante b)

Grundlage für die in Bild 4.3 dargestellte reversible Variante b) ist eine Spannbuchse (3), mit der im Normalbetrieb eine reibschlüssige Verbindung zur Kugelgewindemutter (2) hergestellt wird.

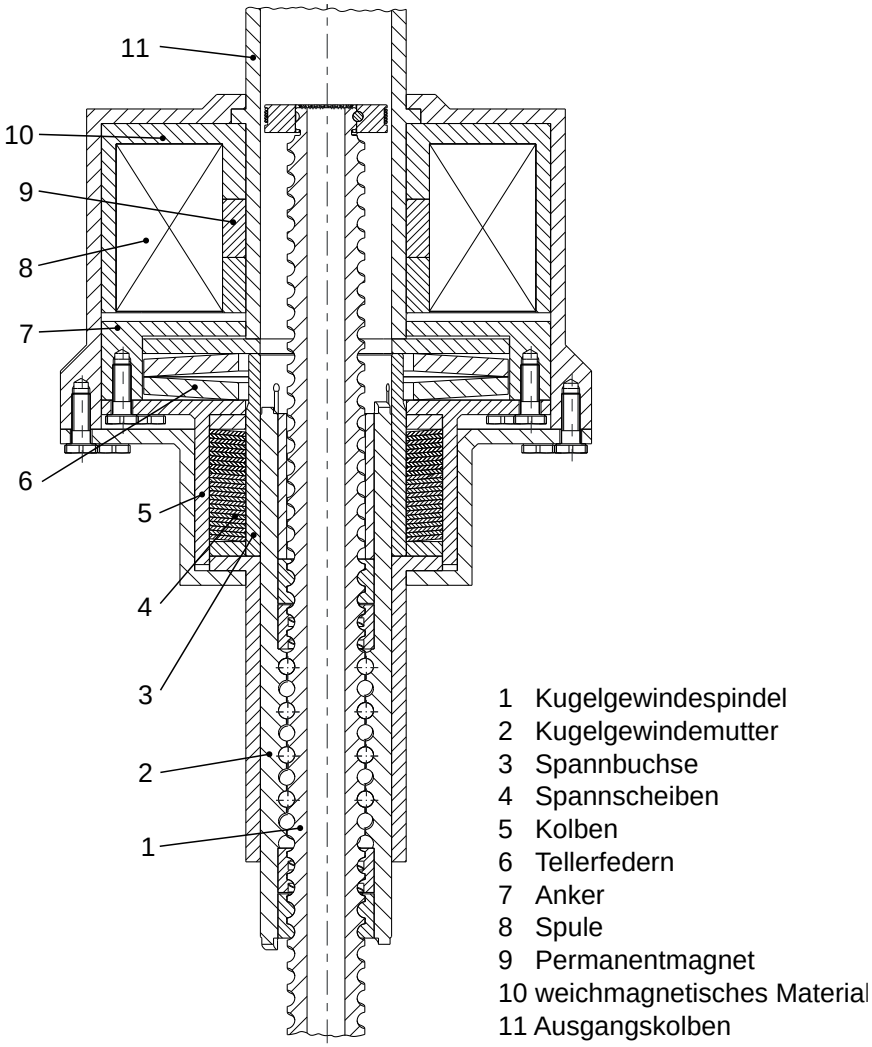


Bild 4.3: Reversible Variante b) im gekoppelten Zustand

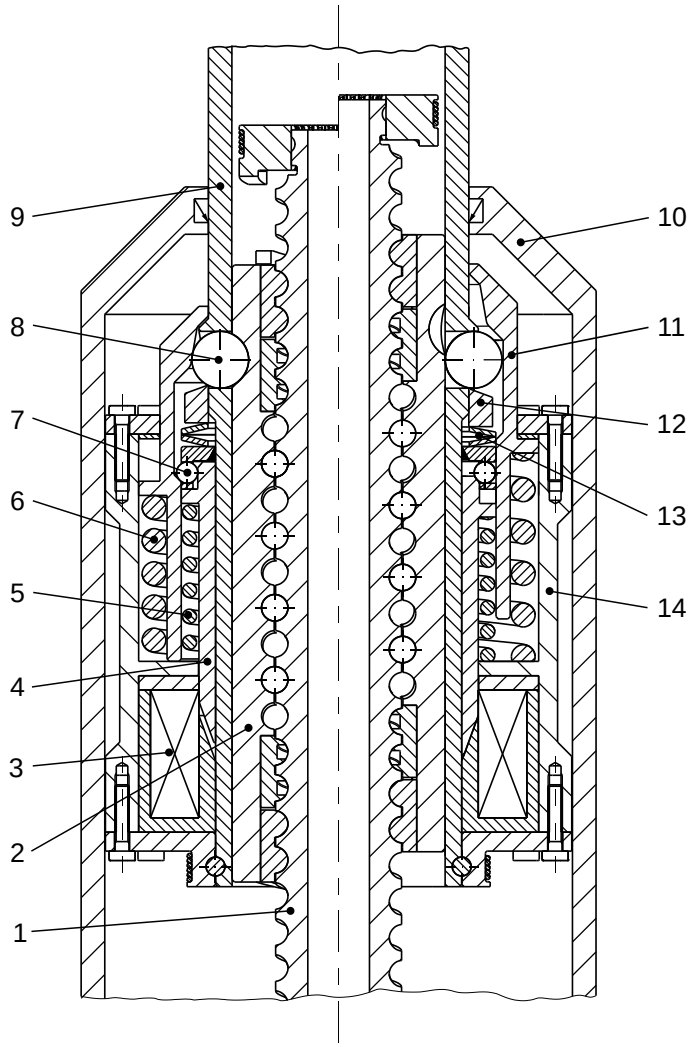
Die für das Entkuppeln notwendige Aktorik besteht aus einem Elektro- (8+10) und einem Permanentmagneten (9), sodass sich die Konstruktion im Vergleich zu einem Konzept ohne Permanentmagneten leichter und kompakter ausführen lässt. Im geschlossenen Zustand der Kupplung wird der Elektromagnet (8+10) derart bestromt, dass sein magnetisches Feld das magnetische Feld des Permanentmagneten (9) nahezu kompensiert. Die vorgespannten Tellerfedern (6) drücken das Spannscheibenpaket (4) über dem mit dem Ankerelement (7) verschraubten Kolben (5) zusammen. Die am Innendurchmesser der Spannscheiben (4) auftretende Radialkraft ist dabei wesentlich größer als die zur Vorspannung aufgebrachte Axialkraft. Mittels der radial

belasteten Spannbuchse (3) wird die reibschlüssige Verbindung zur Kugelgewindemutter (2) hergestellt, um die Axialkräfte des elektromechanischen Aktors reibschlüssig über die mechanische Schnittstelle der Kupplung und formschlüssig zwischen Spannbuchse (3) und Ausgangskolben (11) übertragen zu können. Zum Entkuppeln wird die Stromrichtung des Elektromagneten (8+10) umgekehrt, um das magnetische Feld des Permanentmagneten (9) zu verstärken. Die gemeinsame Magnetkraft zieht das Ankerelement (7) mit dem Kolben (5) an, was zu einer weiteren Verspannung der Tellerfedern (6) und einer Entlastung der Spannscheiben (4) führt. Die Spannscheiben (4) werden mindestens so weit entlastet, bis sich der Kontakt an der mechanischen Schnittstelle der Kupplung öffnet und der Kraftfluss des elektromechanischen Aktors unterbrochen wird.

Der Permanentmagnet (9) soll derart dimensioniert werden, dass gegebenenfalls eine geforderte Ausfallsicherheit, d. h. geforderte Übertragungsfähigkeit von Axialkräften im unbestromten Zustand, eingehalten wird.

4.1.3.3 Reversible Variante c)

Bild 4.4 zeigt die Linearkupplung, die das erste Kugelpaket (8) zum Leiten des Kraftflusses zwischen der angetriebenen Kugelgewindemutter (2) und dem Ausgangskolben (9) verwendet. Zur Abstützung in radialer Richtung ist die Sperrhülse (11) über das erste Kugelpaket (8) geschoben. Ihre Position wird durch das zweite Kugelpaket (7) gehalten, das sich im gekoppelten Zustand an der Ankerhülse (4) abstützt.



1 Kugelgewindespindel
2 Kugelgewindemutter
3 Elektromagnet
4 Ankerhülse
5 innere Schraubenfeder
6 äußere Schraubenfeder
7 zweites Kugelpaket
8 erstes Kugelpaket
9 Ausgangskolben
10 Gehäuse des elektromechanischen Aktors
11 Sperrhülse
12 Halteelement
13 Sternfedern
14 Kupplungsgehäuse

Bild 4.4: Reversible Variante c) im gekoppelten Zustand (linke Hälfte) und im entkoppelten Zustand (rechte Hälfte)

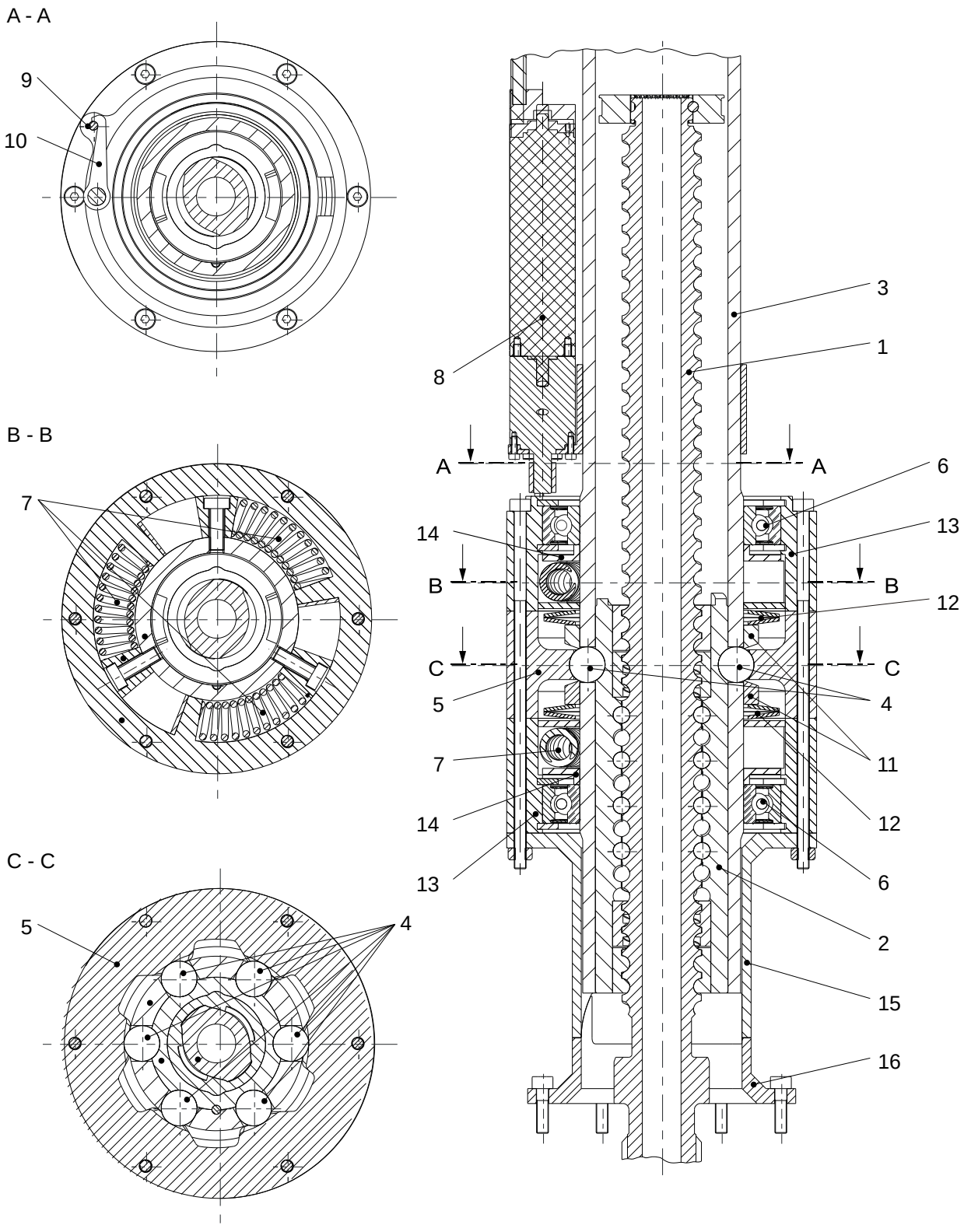
Zur Betätigung der Kupplung ist der Elektromagnet (3) kurzzeitig mit Strom zu versorgen, was zum Einfahren der Ankerhülse (4) führt. Dafür muss die Magnetkraft des Elektromagneten (3) größer sein als die Summe der Federkraft der inneren Schraubenfeder (5) und der Reibkräfte an der Ankerhülse (4). Bei eingefahrener Ankerhülse (4) wird das zweite Kugelpaket (7) radial entriegelt, sodass die in der äußeren Schraubenfeder (6) gespeicherte Schaltenergie freigegeben wird. Die Kraft der äußeren

Schraubenfeder (6) drückt erstens das zweite Kugelpaket (7) radial nach innen und zweitens die Sperrhülse (11) nach oben. Über dem ersten Kugelpaket (8) ist in dieser Position die Sperrhülse (11) so gestaltet, dass äußere Axialkräfte eine Verschiebung des ersten Kugelpakets (8) radial nach außen bewirken, bis der Kraftfluss zwischen Ausgangskolben (9) und Kugelgewindemutter (2) unterbrochen ist. Das mittels zwei Sternfedern (13) gespannte Halteelement (12) verhindert das ungewollte Wiedereinrücken des ersten Kugelpakets (8).

Im Rahmen automatisierter Vorflugtests lassen sich nach dem Entkuppeln der Ausgangskolben (9) durch den redundanten elektromechanischen Aktor und die Kugelgewindemutter (2) mit Hilfe des Motors des getesteten Aktors positionieren. Für das Einkuppeln der Linearkupplung einschließlich des Zurücksetzens des mechanischen Energiespeichers ist der Kugelgewindetrieb mit überschüssigem Hub ausgestattet. Fährt der redundante elektromechanische Aktor die Sperrhülse (11) gegen das Gehäuse des zu testenden elektromechanischen Aktors (10), wird die äußere Schraubenfeder (6) wieder gespannt. Währenddessen wird die Kugelgewindemutter (2) mit dem Motor des zu testenden elektromechanischen Aktors langsam vom oberen Endanschlag nach unten bewegt, bis das erste Kugelpaket (8) langsam in seine eingekuppelte Stellung rutscht. Ohne Bestromung des Elektromagneten (3) reicht die Kraft der inneren Schraubenfeder (5) aus, um die Ankerhülse (4) und das zweite Kugelpaket (7) in ihre Ausgangspositionen zu verrücken. Axialkräfte lassen sich wieder zwischen Ausgangskolben (9) und Kugelgewindemutter (2) leiten.

4.1.3.4 Reversible Variante d)

Beim Auslösevorgang der reversiblen Variante d) wird ein mechanischer Energiespeicher durch kurzzeitiges Betätigen einer Motor-Getriebe-Einheit (8) freigegeben. Zweck dieser Kombination ist die Realisierung eines schnell schaltenden Entkuppelns bei kompakter und leichter Bauweise. Im Rahmen automatisierter Vorflugtests erfolgt das Zurücksetzen des Energiespeichers mit Hilfe des redundanten elektromechanischen Aktors.



1 Kugelgewindespindel
2 Kugelgewindemutter
3 Ausgangskolben
4 Sperrkugeln
5 Sperrhülse
6 Wälzlager
7 Bogenfedern
8 Motor-Getriebe-Einheit
9 Sperrstift
10 Schalthebel
11 Halteelemente
12 Sternfedern
13 Bogenfederführungen
14 Struktur
15 Rückstellhülse
16 Gehäuse des elektromechanischen Aktors

Bild 4.5: Reversible Variante d) im gekoppelten Zustand

Bild 4.5 zeigt die geschlossene Kupplung bei ausgefahrenem elektromechanischen Aktor, bei der das Kugelpaket (4) den Kraftfluss zwischen der angetriebenen Kugelgewindemutter (2) und dem Ausgangskolben (1) leitet. Zur Abstützung des Kugelpakets (4) in radialer Richtung dient die Sperrhülse (5). Sie ist mit der Rückstellhülse (15) und den Bogenfederführungen (13) zu einer Hülsenkombination verschraubt, an der die gespannten Bogenfedern (7) angreifen. Im gekuppelten Zustand fixiert ein Schalthebel (10) die Hülsenkombination.

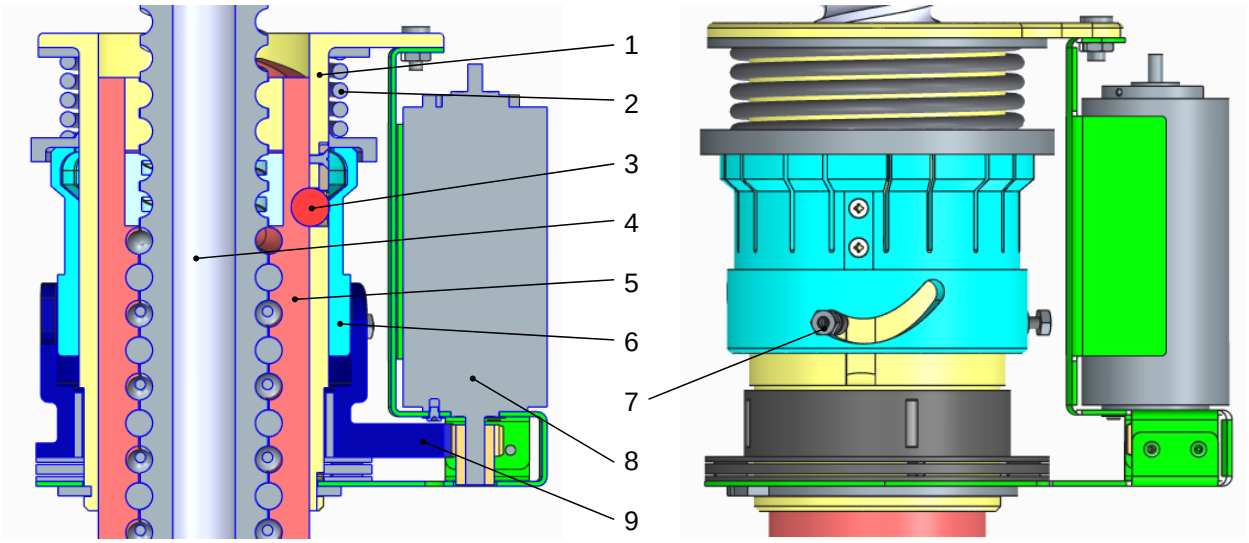
Zur Betätigung wird die Motor-Getriebe-Einheit (8) kurzzeitig bestromt, damit der Schalthebel (10) die Fixierung aufhebt. Die in den Bogenfedern (7) gespeicherte Energie bewirkt die Rotation der Sperrhülse (5) in ihre entkuppelte Position, sodass die Kugeln (4) in die Aussparungen der Sperrhülse (5) geschoben werden können. Äußere Axialkräfte auf den zu testenden elektromechanischen Aktor bewirken eine Verschiebung des Kugelpakets (4) radial nach außen, bis der Kraftfluss zwischen Ausgangskolben (3) und Kugelgewindemutter (2) unterbunden ist. Zwei mittels Sternfedern (12) gespannte Halteelemente (11) sperren das Kugelpaket (4) in geöffneter Position.

Analog zur reversiblen Variante d) können der Ausgangskolben (3) mit Hilfe des redundanten elektromechanischen Aktors und die Kugelgewindemutter (2) mittels des zu testenden elektromechanischen Aktors nach dem Entkuppeln in automatisierten Vorflugtests positioniert werden. Werden die schrägen Flächen der Rückstellhülse (15) und des Gehäuses (16) (dargestellt in Bild 4.5 am unteren Ende der Rückstellhülse und am oberen Ende des Gehäuses) aufeinander gedrückt, dreht sich die Hülsenkombination in ihre ursprüngliche Position zurück und spannt dabei auch die Bogenfedern (7). Zeitgleich wird der zu testende elektromechanische Aktor so positioniert, dass das Kugelpaket (4) wieder in seine gekuppelte Position rutscht und Axialkräfte zwischen dem Ausgangskolben (3) und der Kugelgewindemutter (2) übertragen werden können.

4.1.3.5 Reversible Variante e)

Bild 4.6 und zeigt Baugruppen- und Schnittbilder zur reversiblen Variante e)[3] im gekoppelten Zustand (siehe [NAUBERT14B], S. 25f).

[3] Das Konzept in [NAUBERT14B] S. 25ff wurde von phi Service Engineering AG konstruiert.



1 Ausgangskolben
2 Schraubenfeder
3 Sperrkugeln
4 Kugelgewindespindel
5 Kugelgewindemutter
6 geschlitzte Hülse
7 Kulissenführung
8 Elektromotor
9 Getriebe

Bild 4.6: Reversible Variante e) im gekoppelten Zustand im Schnittbild (links), als Baugruppe mit ausgeblendetem Zahnrad und sichtbarer Kulissenführung (rechts)

Zum Leiten des axialen Kraftflusses sitzen neun Sperrkugeln (3) in entsprechenden sphärischen Bohrungen der Kugelgewindemutter (5) und in Durchgangsbohrungen des Ausgangskolbens (1), während als radiale Abstützung eine geschlitzte Hülse (6) über die Sperrkugeln (3) geschoben ist. Durch die biegeweiche Gestaltung der Hülse (6) werden Vorspannkräfte auf die Sperrkugeln (3) aufgebracht und radiales Spiel kompensiert. Um die reversible Variante e) zu entkuppeln, muss die Hülse (6) axial nach unten verschoben werden, bis sich die Nut an der Hülseninnenseite (6) über den Sperrkugeln (3) befindet. In dieser Position sind die Sperrkugeln (3) radial frei beweglich, sodass aufgrund extern auf den Kolben (1) wirkender Kräfte die Sperrkugeln (3) in die Nut gedrückt werden, was den Kraftfluss unterbricht. Als Kupplungsaktorik ist hierfür ein Elektromotor (8) installiert, dessen Drehmoment über eine Stirnradverzahnung (9) verstärkt wird. Kennzeichnend für die Variante e) ist vor allem die am Getrieberad (9) angebrachte Kulissenführung (7), welche die Drehbewegung des Rades (9) mit der Längsbewegung der Hülse (6) koppelt. Dabei ist die Kulissennut derart gestaltet, dass zu Beginn des Entkoppelungsvorgangs die Hülse (6) gegen die Kraft einer Schraubenfeder (2) verschoben werden muss. Diese Ausführungsvariante verhindert ein ungewolltes Auslösen der Kupplung, wie es beispielweise durch starke Vibrationen oder andere Beschleunigungen während des Fluges initiiert werden könnte. Nach dem

Überschreiten des Totpunktes führen die Kontur der Kulissennut (7) und die Kraft der Schraubenfeder (2) zum Entkuppeln des Antriebsstrangs.

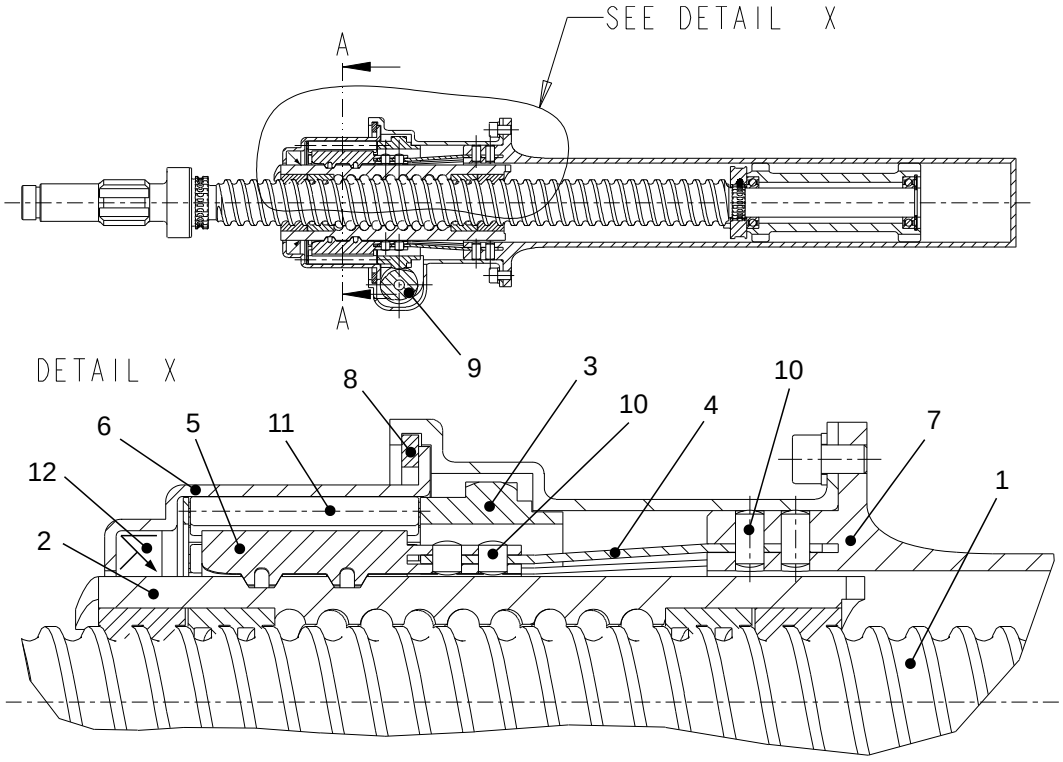
Im Rahmen von Vorflugversuchen erfolgt das Zurückzusetzen der Kupplung, indem die Sperrkugeln (3) zuerst mittels der redundanten elektromechanischen Aktoren über den sphärischen Bohrungen der Kugelgewindemutter (5) positioniert werden. Erst dann wird die Kupplungsaktorik so bestromt, dass das Getrieberad (9) verdreht und die Hülse (6) über die Kulissenführung (7) zurückgesetzt wird. In diesem Zug werden ferner die Schraubenfeder (2) vorgespannt, die Sperrkugeln (3) in die sphärischen Bohrungen gedrückt und der Kraftfluss des elektromechanischen Aktors geschlossen.

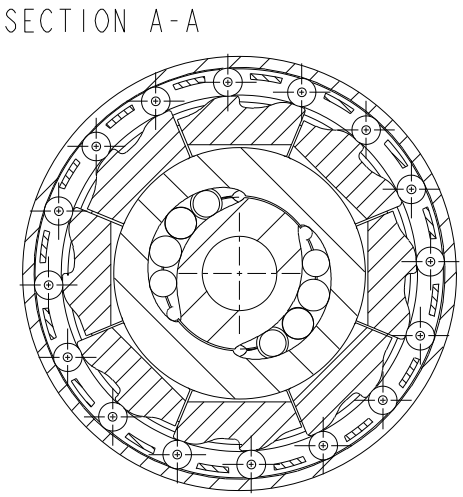
4.1.3.6 Reversible Variante f)

Die reversible Variante f)[4], siehe Bild 4.7, basiert auf acht um die Kugelgewindemutter (2) angeordneten Sperrelementen (5) (siehe [NAUBERT14B], S. 27ff). Jedes dieser Sperrelemente (5) besitzt zwei keilförmige Fortsätze, die im gekoppelten Zustand in zwei umlaufende Nuten der Kugelgewindemutter (2) gepresst werden. Abtriebsseitig sind die Sperrelemente (5) über die vorgespannten Blattfedern (4) am Gehäuseflansch (7) befestigt, sodass der Kraftfluss des elektromechanischen Aktors von der Kugelgewindemutter (2) über die Sperrelemente (5), die Blattfedern (4) und die Verbindungsstifte (10) an den Gehäuseflansch (7) geleitet wird. Die Fortsätze der Sperrelemente (5) sind geschlitzt ausgeführt, um eine axiale Verspannung und Spielkompensation im gekoppelten Zustand zu realisieren. Zur Steuerung der Schaltvorgänge sind Wälzkörper (11) um die Sperrelemente (5) angeordnet, die mit den außen profilierten Konturen der Sperrelemente (5) eine Art Kurvensteuerung ergeben: Im geschlossenen Kupplungszustand hindern die Wälzkörper (5) das Anheben der Sperrelemente (5) aus den Nuten der Kugelgewindemutter (2), da die Wälzkörper (11) über den erhöhten Konturabsätzen positioniert sind. Alle wirkenden Radialkräfte werden folglich von den Wälzkörpern (11) an eine umschließende Hülse (6) weitergeleitet, die ebenso drehbar ist, um die reibungsbedingten Widerstände während des Schaltens so klein wie möglich zu halten. In axialer Richtung fixiert ein Sicherungsring (8) die Hülse (6), sodass die Wälzkörper (11) und die Sperrelemente (5) für Wartungszwecke leicht zugänglich sind. Als Dichtung ist ein Radialwellendichtring (12) am linken Hülsenende

[4] Das Konzept in [NAUBERT14B] S. 27ff wurde von phi Service Engineering AG konstruiert.

eingebaut. Um die Kupplung zu schalten, wird der Käfig der Wälzkörper, an dessen rechter Seite eine Verzahnung (3) angebracht ist, mit Hilfe einer Motor-Schneckengetriebe-Einheit (9) soweit verdreht, bis die Wälzkörper (11) sich über den niedrigen Konturabsätzen befinden. In dieser Position werden die Sperrelemente (5) radial freigegeben.





1 Kugelgewindespindel
2 Kugelgewindemutter
3 Lagerkäfig mit Verzahnung
4 Blattfedern
5 Sperrelemente
6 Hülse
7 Gehäuseflansch
8 Sicherungsring
9 Motor-Schneckengetriebe-Einheit
10 Verbindungsstifte
11 Wälzkörper
12 Radialwellendichtring

Bild 4.7: Reversible Variante f) im gekoppelten Zustand

Einerseits fördert die Vorspannung der Blattfedern (4) das Anheben und Entkuppeln der Sperrelemente (5), andererseits weisen die Sperrelemente (5) und die Nuten in der Kugelgewindemutter (2) eine keilförmige Gestalt auf, die diese Bewegung bei äußerlich

wirkenden Belastungen zusätzlich unterstützt. Die Rollbewegung der Wälzkörper (11) hält das erforderliche Drehmoment des Motors zum Entkuppeln bei hohen äußeren Belastungen minimal.

Um die Linearkupplung während automatisierter Vorflugversuche zurückzusetzen, sind die Fortsätze der Sperrelemente (5) mittels der redundanten elektromechanischen Aktoren über die Nuten der Kugelgewindemutter (2) zu bringen. Danach wird die Motor-Schneckengetriebe-Einheit (9) angesteuert und der Käfig soweit gedreht, bis die Wälzkörper (11) sich wieder über den erhöhten Konturabsätzen der Sperrelemente (5) befinden und deren Fortsätze in die Nuten der Kugelgewindemutter (2) passen. Die Verwendung eines bürstenlosen DC-Motors in Kombination mit einem Schneckengetriebe (9) ermöglicht eine leicht bauende, selbsthemmende Antriebseinheit. Die Eigenschaft der Selbsthemmung verhindert insbesondere ein ungewolltes Auslösen der Kupplung, das durch auftretende Vibrationen initiiert werden könnte.

4.1.4 Bewertung

Im letzten Schritt der Konzeptphase gilt es, die reversiblen Linearkupplungen zu bewerten und miteinander zu vergleichen. Dafür sind die verfolgten Lösungsvarianten soweit konkretisiert, dass qualitatives und quantifizierbares Beurteilen ermöglicht wird. Während die Forderungen aus der Anforderungsliste zwingend zu erfüllen sind und mit Hilfe einer Spezifikation-Verträglichkeits-Matrix kontinuierlich überwacht werden, erfolgt das Erstellen der Bewertungskriterien im Wesentlichen anhand der in der Projektausschreibung vordefinierten Kriterien und der in der Anforderungsliste genannten Wünsche. Eine gleichmäßige Verteilung der Bewertungskriterien über alle Hauptmerkmale garantiert dabei eine ausgewogene Bewertung. Für das Urteilsschema wird eine kleine Wertskala von 0 bis 4 Punkten gewählt, deren Zuweisung bei numerischen Eigenschaftsgrößen mit Hilfe linearer Wertfunktionen erfolgt (siehe Anhang 0). Um die unterschiedliche Bedeutung der Bewertungskriterien zu identifizieren, werden letztere mit Hilfe der Methode des paarweisen Vergleichs anteilmäßig gewichtet.

Tabelle 4.3 zeigt die Bewertungsliste der reversiblen Kupplungen mit qualitativen und quantitativen Eigenschaftsgrößen. Bei den quantitativen Eigenschaftsgrößen lassen sich die Kupplungsmassen und einhüllenden Bauräume direkt aus den CAD-Modellen entnehmen, während die Schaltzeiten für das Entkuppeln mit Hilfe analytischer Berechnungen und teilweise Mehrkörpersimulationen bestimmt werden. Die Eingruppierungen bezüglich Reversibilität und Testbarkeit werden für alle reversiblen Varianten gleich

angenommen. Hier ergeben sich lediglich Unterschiede im Vergleich zu den in Kapitel 4.2.4 beschriebenen Bewertungen der irreversiblen Varianten. Um die Betriebssicherheit der Kupplungen zu bewerten, sind ihre Fehlerraten zu den Ereignissen „ungewolltes Auslösen“ im geschlossenen Kupplungszustand und „fehlerhaftes Entkuppeln“ während des Freischaltens eines klemmenden Antriebsstrangs anzugeben. Als Orientierung dient die von den Hubschrauberherstellern akzeptierte Fehlerrate von 10^{-6} Fehler pro Flugstunde für ein Wälzlager, das sich im axialen Kraftfluss des elektromechanischen Aktors befindet. Die Bewertung bezüglich der maximalen Umgebungstemperaturen erfordert zunächst die Identifikation von kritischen Kupplungskomponenten. Falls vorhanden, sind bei Zukaufbauteilen Werte aus Datenblättern zu entnehmen oder gegebenenfalls bei Lieferanten zu erfragen. Bei kundenspezifischen Komponenten, wie dem redundanten Elektromagneten der reversiblen Variante c), basieren die Betriebstemperaturgrenzen auf Absprachen mit potentiellen Herstellern. Die quantitative Bewertung hinsichtlich der Herstellkosten bezieht sich auf potentielle Serienprodukte, wofür Erfahrungswerte aus bestehenden Serienprodukten und vorhandenen Prototypen zum Einsatz kommen. Die Herstellkosten wurden in Zusammenarbeit mit Umbra Cuscinetti S.p.A. ermittelt. Wesentliche Einflussgrößen stellen hierfür die Fertigungstoleranzen dar, da sie das Herstellverfahren entscheidend beeinflussen. Als nächstes folgen die qualitativen Eigenschaften. Dabei bezieht sich die einfache mechanische Integration sowohl auf den Zusammenbau der Kupplungsbauteile als auch auf die zur Montage notwendigen Anpassungen der anderen Antriebsstrangkomponenten. Je einfacher der Zusammenbau der Baugruppen ist und je geringer die Modifikationen gegenüber standardisierten Antriebsstrangkomponenten ausfallen, desto höher sind die Kupplungen zu bewerten. Mit dem Kriterium der einfachen Regelung und Leistungselektronik soll zum einen der Aufbau der Leistungselektronik, d. h. die Art und Anzahl der verwendeten Bauteile und zum anderen die Struktur der Regelung besonders für die kritischen Entkoppelungsprozesse[5] bewertet werden. Beispielsweise ist die einfache Vorgabe eines Steuersignals für den Antrieb einer komplexeren Motorstromregelung vorzuziehen. Das nächste qualitative Bewertungskriterium hinsichtlich einer einfachen Wartung bezieht sich auf die Anzahl der instand zu haltenden Bauteile, die Art und Weise der Wartungen, die Instandhaltungsintervalle, die Einfachheit der Demontage

[5] Die Regelung der Einkuppelvorgänge ist hinsichtlich der Betriebssicherheit unbedeutender, da sie lediglich im Rahmen von Vorflugversuchen durchgeführt werden.

und die Zugänglichkeit zu den Bauteilen. Generell sind die verschiedenen Sicherheitschecks nach behördlichen Instandhaltungsprogrammen durchzuführen, wohingegen die Intervalle zwischen zwei planmäßigen Wartungen stark vom Luftfahrzeugtyp und von der Fluggesellschaft abhängen. Wesentliche Unterschiede ergeben sich durch die Gestaltung der Kupplungen, die direkt die Demontage (z. B. Wahl lösbarer oder unlösbarer Verbindungen) und die Zugänglichkeit der Bauteile beeinflusst. Ferner lassen sich die Entwicklungsrisiken der Kupplungen anhand der verwendeten Wirkprinzipien beurteilen. Einerseits können neuartige Wirkprinzipien zwar zu sprunghaften Verbesserungen bei der Erfüllung bestimmter Anforderungen führen und bei den dazugehörigen Bewertungskriterien hoch punkten, andererseits bergen sie höhere Entwicklungsrisiken als bewährte Wirkprinzipien. Folglich resultiert aus der Summe aller in der Bewertungsliste aufgeführten gewichteten Werte, ob der Schritt zu neuartigen Wirkprinzipien einzugehen ist oder nicht. Zuletzt sind die Kupplungen qualitativ hinsichtlich ihrer Bauteilkomplexitäten zu beurteilen. Einfachere Bauteile führen im Allgemeinen zu geringeren Herstellkosten, einfacheren Qualitätskontrollen und einfacheren Wechselwirkungen zwischen den Bauteilen.

Als favorisierte Lösung setzt sich in Tabelle 4.3 die reversible Variante c) durch. Eine Betrachtung der Bewertung der einzelnen Kriterien offenbart, dass die reversible Variante c) bei allen Eigenschaften konstant hoch punktet und keine der anderen Lösungsvarianten ein derart ausgeglichenes Eigenschaftsprofil aufweist.

Für die Bewertung der Linearkupplungen wurde in Absprache mit dem Projektteam die Grundstruktur der Bewertungsliste vom Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design aufgestellt. Die konkreten Eigenschaften, insbesondere die qualitativen Größen, wurden in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Umbra Cuscinetti S.p.A. (Variante a) – d)) und Phi Engineering AG (Varianten e) und f)) ermittelt. Anschließend wurde die Bewertung mit allen Projektpartnern besprochen und von allen freigegeben.

Nr.	Bewertungskriterien	Gew.	Eigenschaftsgrößen	Einh.	reversible Variante a)			reversible Variante b)			reversible Variante c)		
					Eigenschaft	Wert	gew. Wert	Eigenschaft	Wert	gew. Wert	Eigenschaft	Wert	gew. Wert
1	leichte Bauart	0,13	Masse der Kupplung	kg	1,8	1	0,13	4,3	0	0,00	1,17	4	0,52
2	kompakter Bauraum	0,09	einhüllender Bauraum	mm^3	$1,4 \cdot 10^6$	3	0,27	$4,0 \cdot 10^6$	1	0,09	$1,1 \cdot 10^6$	3	0,27
3	schnelles Entkuppeln	0,06	Schaltzeit für das Entkuppeln	ms	44	1	0,06	20	4	0,24	7,5	4	0,24
4	hoher Grad der Reversibilität & Testbarkeit	0,14	Einstufung bzgl. Reversibilität & Testbarkeit	-	automatisiert & voll funktional testbar	4	0,56	automatisiert & voll funktional testbar	4	0,56	automatisiert & voll funktional testbar	4	0,56
5	betriebssicheres Verhalten	0,12	Fehlerraten „ungewolltes Auskuppeln“ & „fehlerhaftes Entkuppeln“	-	$2,0 \cdot 10^{-6}$	1	0,12	$5,0 \cdot 10^{-7}$	3	0,36	$1,0 \cdot 10^{-7}$	4	0,48
6	gute Temperaturresistenz	0,03	maximale Betriebstemperatur für 15 min	°C	210	1	0,03	300	4	0,12	300	4	0,12
7	einfache mechanische Integration	0,06	Aufwand zur mechanischen Integration	-	sehr gering	4	0,24	mittel	2	0,12	sehr gering	4	0,24
8	einfache Steuerung und Leistungselektronik	0,02	Aufwand zur Steuerung und Leistungselektronik	-	gering	3	0,06	gering	3	0,06	sehr gering	4	0,08
9	wartungsarm	0,09	Wartungsaufwand	-	gering	3	0,27	gering	3	0,27	sehr gering	4	0,36
10	kostengünstig	0,08	Herstellkosten	€	3000	1	0,08	2500	2	0,16	2100	3	0,24
11	risikoarm bzgl. der Entwicklung	0,11	Entwicklungsrisiko	-	sehr gering	4	0,44	gering	3	0,33	sehr gering	4	0,44
12	einfache Bauteile	0,07	Bauteilkomplexität	-	gering	3	0,21	sehr gering	4	0,28	sehr gering	4	0,28
		1,00				29	2,47		33	2,59		46	3,83
				Rang			5			4			1

Tabelle 4.3: Bewertungsliste zu den reversiblen Linearkupplungen

Nr.	Bewertungskriterien	Gew.	Eigenschaftsgrößen	Einh.	reversible Variante d)			reversible Variante e)			reversible Variante f)		
					Eigenschaft	Wert	gew. Wert	Eigenschaft	Wert	gew. Wert	Eigenschaft	Wert	gew. Wert
1	leichte Bauart	0,13	Masse der Kupplung	kg	1,35	3	0,39	1,5	2	0,26	1,9	0	0,00
2	kompakter Bauraum	0,09	einhüllender Bauraum	mm^3	$1{,}2 \cdot 10^6$	3	0,27	$1{,}1 \cdot 10^6$	3	0,27	$7{,}5 \cdot 10^5$	4	0,36
3	schnelles Entkuppeln	0,06	Schaltzeit für das Entkuppeln	ms	15	4	0,24	12	4	0,24	20	4	0,24
4	hoher Grad der Reversibilität & Testbarkeit	0,14	Einstufung bzgl. Reversibilität & Testbarkeit	-	automatisiert & voll funktional testbar	4	0,56	automatisiert & voll funktional testbar	4	0,56	automatisiert & voll funktional testbar	4	0,56
5	betriebssicheres Verhalten	0,12	Fehlerraten „ungewolltes Auskuppeln“ & „fehlerhaftes Entkuppeln“	-	$1{,}0 \cdot 10^{-6}$	2	0,24	$2{,}0 \cdot 10^{-6}$	1	0,12	$3{,}0 \cdot 10^{-6}$	0	0,00
6	gute Temperaturresistenz	0,03	maximale Betriebstemperatur für 15 min	°C	300	4	0,12	210	1	0,03	210	1	0,03
7	einfache mechanische Integration	0,06	Aufwand zur mechanischen Integration	-	gering	3	0,18	mittel	2	0,12	mittel	2	0,12
8	einfache Steuerung und Leistungselektronik	0,02	Aufwand zur Steuerung und Leistungselektronik	-	mittel	2	0,04	gering	3	0,06	gering	3	0,06
9	wartungsarm	0,09	Wartungsaufwand	-	gering	3	0,27	gering	3	0,27	mittel	2	0,18
10	kostengünstig	0,08	Herstellkosten	€	2500	2	0,16	2100	3	0,24	3000	1	0,08
11	risikoarm bzgl. der Entwicklung	0,11	Entwicklungsrisiko	-	sehr gering	4	0,44	sehr gering	4	0,44	hoch	1	0,11
12	einfache Bauteile	0,07	Bauteilkomplexität	-	sehr gering	4	0,28	sehr gering	4	0,28	mittel	2	0,14
		1,00				38	3,19		34	2,89		24	1,88
				Rang			2			3			6

Tabelle 4.3: Bewertungsliste zu den reversiblen Linearkupplungen (Fortsetzung)

4.2 Irreversible fremdbetätigte Linearkupplungen

4.2.1 Funktionsstruktur

In Bild 1.1 ist die Funktionsstruktur der irreversiblen fremdbetätigten Linearkupplung dargestellt, die sich in die drei Untersysteme „Steuerung“, „Aktorik“ und „Mechanismus“ aufteilt. Als Hauptfluss (Funktionen M1, M2 und M3) kristallisiert sich der mechanische Energiefluss im Untersystem „Mechanismus“ heraus, da die entsprechende Hauptfunktion „Energie leiten / nicht leiten“ (Funktion M2) direkt das Schalten der Kupplung beschreibt. Zur Betätigung weist die Funktionsstruktur zwei redundante Nebenflüsse auf, bei denen nach Kommandierung (Funktionen E1 und E2) jeweils elektrische Energie freigegeben und im Allgemeinen an Energiewandler geleitet wird (Funktionen A1, A2, A3 und A4). Entscheidend für die Entwicklung von kompakten Leichtbaukonstruktionen ist die Funktion „Energie speichern“ (Funktion A5), zu deren Freischaltung (Funktion A6) die beiden Energien aus den redundanten Nebenflüssen gebraucht werden. Die gespeicherte Energie wird bei der Montage der Kupplung zugeführt, gilt als Schaltenergie und bewirkt gegebenenfalls nach einer zusätzlichen Energiewandlung (Funktion A7) das Öffnen des mechanischen Hauptflusses der Kupplung. Die überschüssige Schaltenergie wird absorbiert (M4).

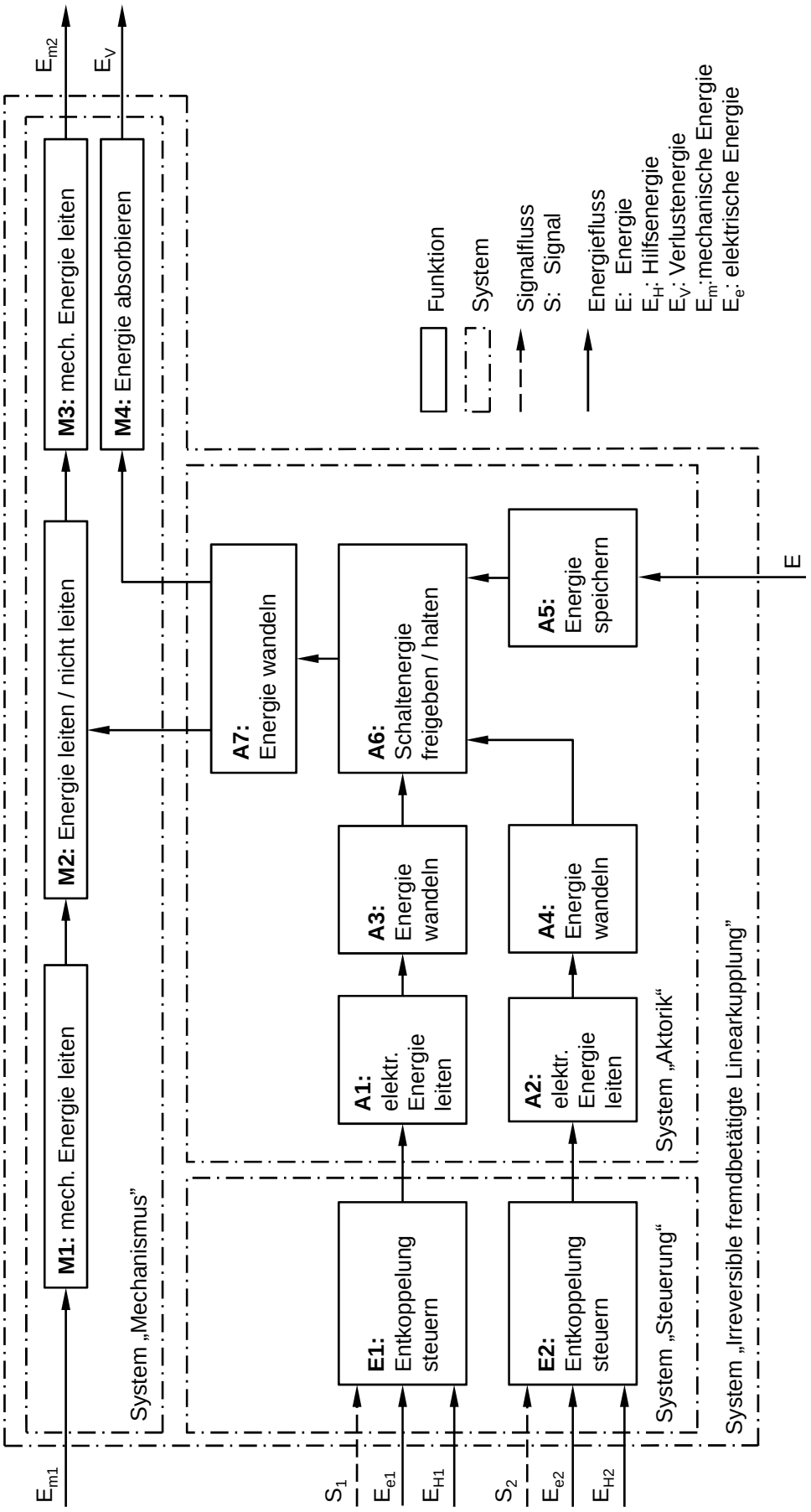


Bild 4.8: Funktionsstruktur für irreversible fremdbetätigte Linearkupplungen

4.2.2 Morphologischer Kasten

Als nächster Schritt folgt die Suche nach Teillösungsideen zu jeder Funktion der Funktionsstruktur, welches den Einsatz von Methoden nach Kapitel 4.1.2 erfordert. Insbesondere die Erkenntnisse aus Kapitel 2.5 zu den pyrotechnischen Technologien in Sicherheitsanwendungen liefern hier spezifische Teillösungsideen für die Kupplungsaktorik.

M1: mech. Energie leiten	M1.1 Ausgangs-kolben	M1.2 Flanschver-bindung							
M2: Energie leiten / nicht leiten	M2.1 direkt betätigte Stifte	M2.2 entriegelbare Stifte	M2.3 entriegelbare Kugeln	M2.4 Schaltseg-mente	M2.5 Spannhülse	M2.6 Spannbacken	M2.7 Spannele-mente	M2.8 Keilelemente	M2.9 Sollbruchstelle
M3: mech. Energie leiten	M3.1 Kugelgewinde-mutter	M3.2 Kugelgewinde-spindel	M3.3 Flanschver-bindung						
M4: Energie absorbieren	M4.1 fester Endanschlag	M4.2 Elastomer	M4.3 Schrauben-feder	M4.4 fluidischer Absorber	M4.5 Wabenstruktur	M4.6 verkeilende Ringe	M4.7 beulende Hülse	M4.8 Aluminium-schaum	M4.9 zerbrechende Hülse
E1 / E2: Entkopp-lung steuern	E1.1 Steuerung der Kupplung								

Tabelle 4.4: Morphologischer Kasten für irreversible Linearkupplungen

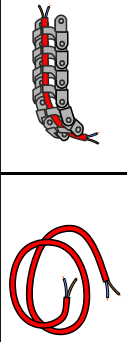
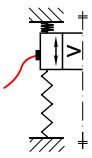
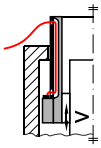
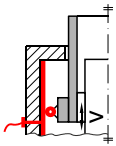
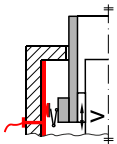
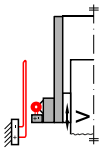
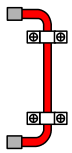
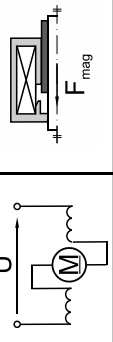
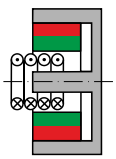
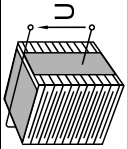
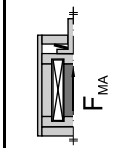
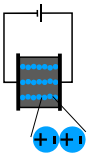
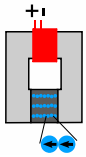
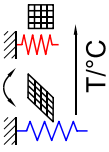
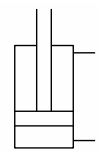
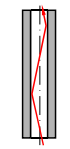
A1 / A2: elektr. Energie leiten	A1.1 flexibles Kabel	A1.2 flexibles Kabel & Energiekette	A1.3 flexibles Kabel & Faltenbalg	A1.4 Kabel in Nut geführt	A1.5 Rollen	A1.6 Schleifkontakt	A1.7 Lichtwellenleitertechnik	A1.8 kontaktlose Übertragung	A1.9 starres Kabel
									
A3 / A4: Energie wandeln	A3.1 Elektromotor	A3.2 Elektromagnet	A3.3 Tauchspulenmotor	A3.4 piezoelektrischer Aktor	A3.5 magnetostriktiver Aktor	A3.6 elektrorheologischer Aktor	A3.7 magnetorheologischer Aktor	A3.8 Formgedächtnislegierung	A3.9 fluidischer Aktor
									
	A3.10 keine Wandlung								
	-								
A5: Energie ändern	A5.1 Formänderungsenergie	A5.2 kinetische Energie	A5.3 potentielle Energie / Grav.	A5.4 Batterie	A5.5 Kondensator	A5.6 Permanentmagnet	A5.7 supraleitende ma. Energiesp.	A5.8 Drucktank	A5.9 Flüssigkeit
									
	A5.10 Treibladung	A5.11 kein Energiespeicher							
	-								

Tabelle 4.4: Morphologischer Kasten für irreversible Linearkupplungen (Fortsetzung)

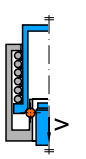
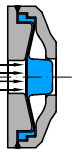
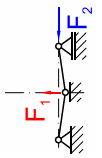
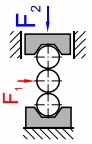
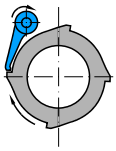
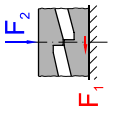
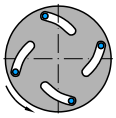
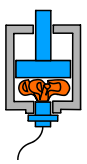
A6: Schaltenerg. freigeben / halten	A6.1	A6.2	A6.3	A6.4	A6.5	A6.6	A6.7	A6.8	A6.9
	Verrigelungs-mechanismus	flexible Membran	Kniegelenk	gespapelte Kugeln	Kurvensteue-rung	Steilgewinde	Kulisenführung	Zündfunke	Berstmembran
									
A7: Energie wandeln	A7.1	A7.2	A7.3	A7.4	A7.5	A7.6			
	Schneideein-heit	Pinpuller / -pusher	Gasgenerator mit Hülse	Trennschraube	Druckluft mit Hülse	keine Wandlung			
						-			

Tabelle 4.4: Morphologischer Kasten für irreversible Linearkupplungen (Fortsetzung)

Zum Überblick sind alle wesentlichen Teillösungsideen auf erster konkreter Stufe, die sogenannten Wirkprinzipien, im morphologischen Kasten der Tabelle 4.4 aufgelistet. Mit dieser Strukturierung werden geeignete Wirkprinzipien zu Gesamtkonzepten (siehe Tabelle 4.5) kombiniert, im Folgenden detailliert beschrieben und ausführlich bewertet.

Vari-ante	Wirkprinzipien									
a)	M1.1	M2.5	M3.2	M4.6	E1.1	A1.1	A3.10	A5.10	A6.8	A7.1
b)	M1.1	M2.1	M3.1	M4.6	E1.1	A1.1	A3.10	A5.10	A6.8	A7.2
c)	M1.1	M2.2	M3.1	M4.5	E1.1	A1.1	A3.10	A5.10	A6.8	A7.3
d)	M1.1	M2.5	M3.2	M4.1	E1.1	A1.1	A3.10	A5.10	A6.8	A7.4
e)	M1.1	M2.2	M3.1	M4.5	E1.1	A1.1	A3.1	A5.8	A6.9	A7.6
f)	M1.1	M2.2	M3.1	M4.5	E1.1	A1.1	A3.2	A5.1	A6.1	A7.6

Tabelle 4.5: Kombinationen von Wirkprinzipien zu Gesamtkonzepten der irreversiblen fremdbetätigten Linearkupplungen

4.2.3 Konzeptbeschreibungen

4.2.3.1 Irreversible Linearkupplung a)

Die irreversible Linearkupplung a) ist für Gewindetriebe mit rotierender Mutter und linear bewegter Spindel konzipiert und resultiert, wie in Kapitel 2.1.5 beschrieben, in einen „2 x Hub“-Aktor. Im geschlossenen Kupplungszustand, siehe Bild 4.9, schließt die an der Kugelgewindespindel (7) befestigte Spannbuchse (5) den Kraftfluss des elektromechanischen Aktors.

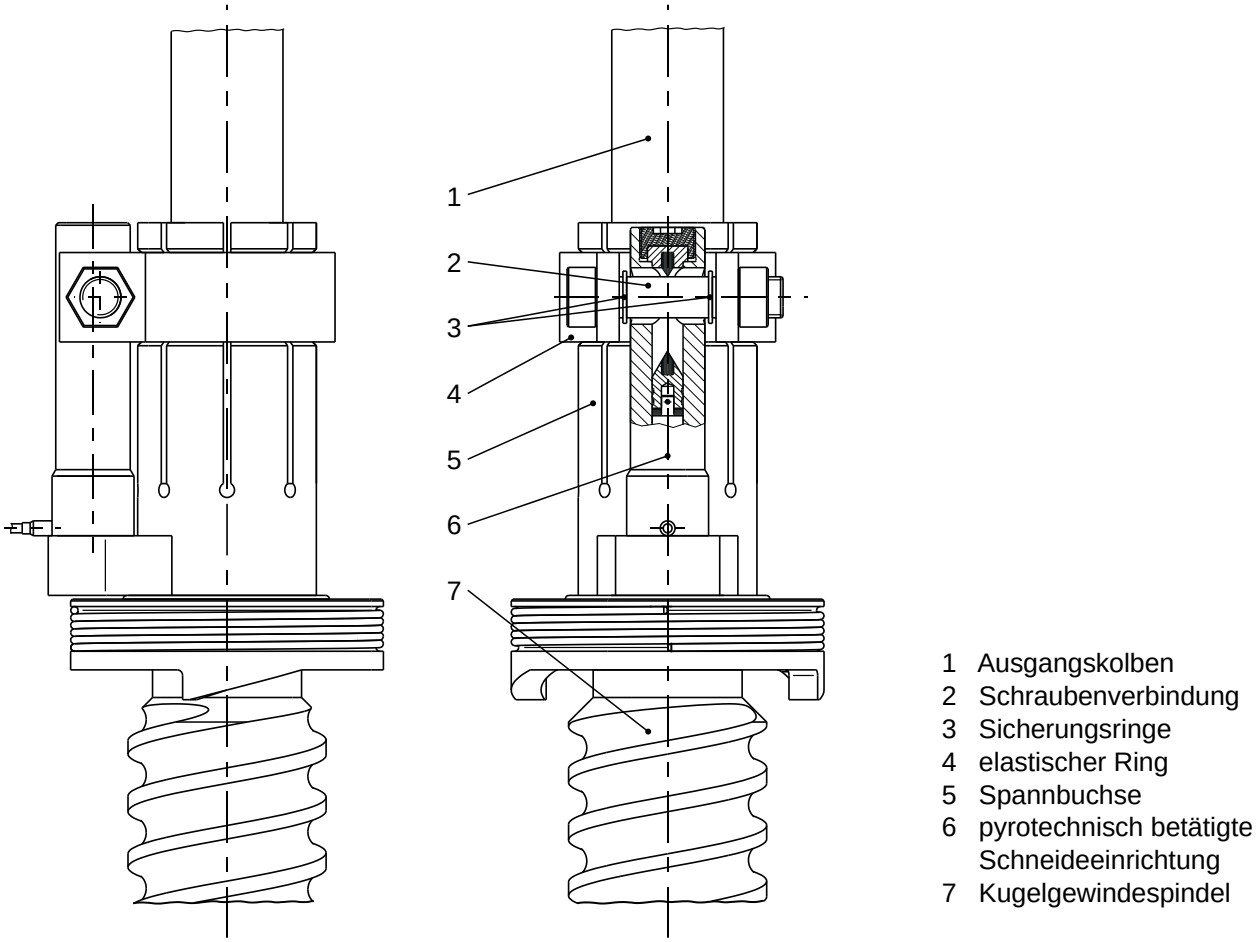


Bild 4.9: Irreversible Linearkupplung a) mit Spannbuchse und pyrotechnisch betätigter Schneideeinrichtung

Um die kraftschlüssige Verbindung der Spannbuchse (5) mit dem Ausgangskolben (1) herzustellen, bringen der elastische Ring (4) und die Schraubenverbindung (2) die notwendigen Vorspannkräfte auf die Spannbuchse (5). Dabei ist die Befestigungsschraube (2) durch die Öffnung der pyrotechnisch betätigten Schneideeinrichtung (6) (siehe Kapitel 2.5) geführt. Mit der Bestromung der Zündkreise wird der Entkoppelungsvorgang der Linearkupplung eingeleitet. Die während der chemischen Reaktion erzeugten Gase treiben die Schneideklinge innerhalb der Schneideeinrichtung an, bis

die Befestigungsschraube (2) in zwei Hälften getrennt wird. Damit wird die Vorspannung auf die Spannbuchse (5) aufgehoben, sodass die kraftschlüssige Verbindung zwischen der Spannbuchse (5) und dem Ausgangskolben (1) unterbrochen wird. Der Antriebsstrang ist somit entkuppelt. Beide Hälften der Befestigungsschrauben (2) sowie der elastische Ring (4) sind derart konstruiert, dass sie auch nach dem Entkuppeln an der Linearkupplung verbleiben. Zudem wird der freigängige Ausgangskolben (1) innerhalb der hohlgebohrten Kugelgewindespindel (7) geführt.

4.2.3.2 Irreversible Linearkupplung b)

Die irreversible Linearkupplung b), siehe Bild 4.10, ist zwischen Ausgangskolben (1) und linear bewegter Kugelgewindemutter (2) eingebaut und leitet die Kräfte des elektromechanischen Aktors über formschlüssige Sperrstifte (8), sodass nach Kapitel 2.1.5 ein „1 x Hub“-Aktor vorliegt.

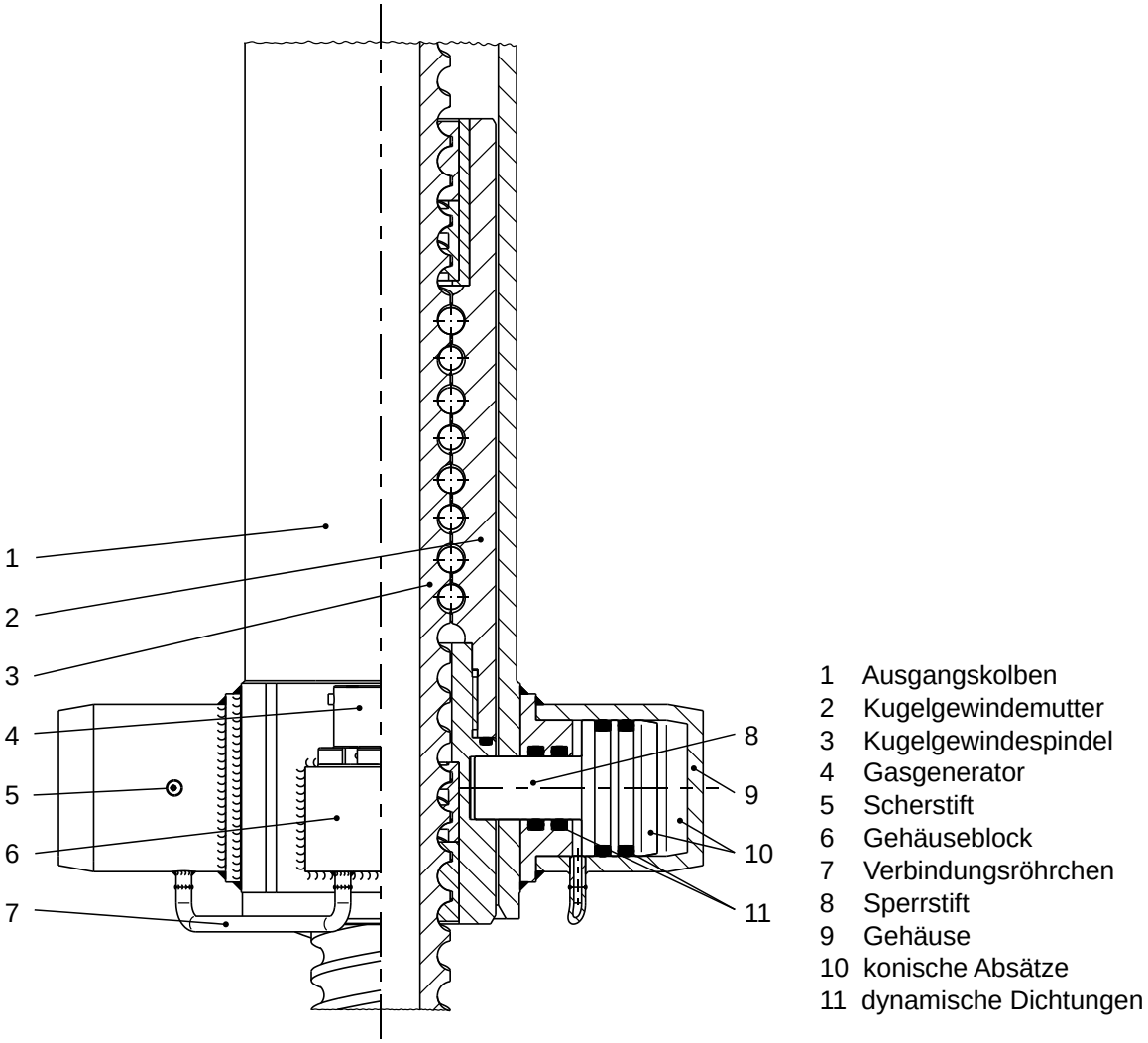


Bild 4.10: Irreversible Linearkupplung b) im gekoppelten Zustand

Da die Sperrstiftenden zur Kugelgewindemutter (2) hin zylindrisch ausgeführt sind, wirken im gekoppelten Kupplungszustand nominell keine treibenden Kräfte auf die Sperrstifte (8). Ihre Positionen werden dabei mittels Scherstiften (5) in den Gehäusebauteilen (9) fixiert. Neben den beiden Baugruppen der Sperrstifte (8) weist die Linearkupplung eine weitere Baugruppe mit einem Gasgenerator (4), einem Gehäuseblock (6) und zwei Verbindungsröhrchen (7) auf. Bei ausreichender Bestromung der beiden redundanten Zündkreise wird der Entkoppelungsvorgang der Linearkupplung eingeleitet und die chemische Reaktion im Gasgenerator (4) aktiviert. Die Verbindungsröhrchen (7) leiten sodann das generierte Gasgemisch zu den beiden Sperrstiften (8), um dort jeweils treibende Kräfte aufzubauen. Mit dem Überschreiten des Auslösedrucks werden die Widerstände der Scherstifte (5) und die Haftreibungskräfte an den Sperrstiften (8) überwunden. Ein wesentliches Merkmal der irreversiblen Linearkupplung b) ist, dass die Betätigungskräfte der Kupplungsaktorik direkt die formschlüssigen Sperrelemente (8) beschleunigen. Sobald die Sperrstifte (8) nicht mehr im Eingriff mit der Kugelgewindemutter (2) stehen, ist der Antriebsstrang freiläufig. Zuletzt erfolgt das Abbremsen der Sperrelemente (8) anhand konischer Absätze (10) an den Stiften und in den Gehäusebauteilen. Dabei verkeilen die Sperrstifte (8) derart, dass sie in ihren entkoppelten Positionen fixiert und ungewollte Rückstellbewegungen verhindert werden.

4.2.3.3 Irreversible Linearkupplung c)

Im gekoppelten Zustand leitet die irreversible Linearkupplung c), siehe Bild 4.11, den Kraftfluss zwischen Ausgangskolben (1) und Kugelgewindemutter (3) mit Hilfe der Sperrstifte (13), die sich in radialer Richtung über das Gleitlager (15) an der Sperrhülse (11) abstützen. Zusammengeschraubt bilden die Bauteile Sperrhülse (11), Gleitlager (15), Scheibe (10) und Zughülse (8) eine Hülsenkombination und werden durch Scherstifte (14) in ihrer Position gehalten. Zum Entkuppeln der irreversiblen Linearkupplung werden zwei redundante Gasgeneratoren (6) aktiviert, sodass das durch die chemische Reaktion erzeugte Gas den Druck in der Druckkammer (5) ansteigen lässt. Beim Erreichen des Auslösedrucks werden die Scherstifte (14), die Haftreibung an den dynamischen Dichtungen (4) sowie die Haftreibung zwischen Sperrstiften (13) und Gleitlager (15) überwunden und die Hülsenbaugruppe nach oben beschleunigt. Dadurch werden die Sperrstifte (13) radial freigegeben, wobei die restliche kinetische Energie der Baugruppe durch das Verfahren der Scheibe (10) gegen die Wabenstruktur (7) absorbiert wird. Sobald äußere Axialkräfte auf den elektromechanischen Aktor wirken, führt dies zum Verschieben der Sperrstifte (13) radial nach außen. Der Kraft-

fluss des elektromechanischen Aktors wird unterbunden. Nach dem Entkuppeln verbleiben die Sperrstifte (13) innerhalb des Gehäuses (9).

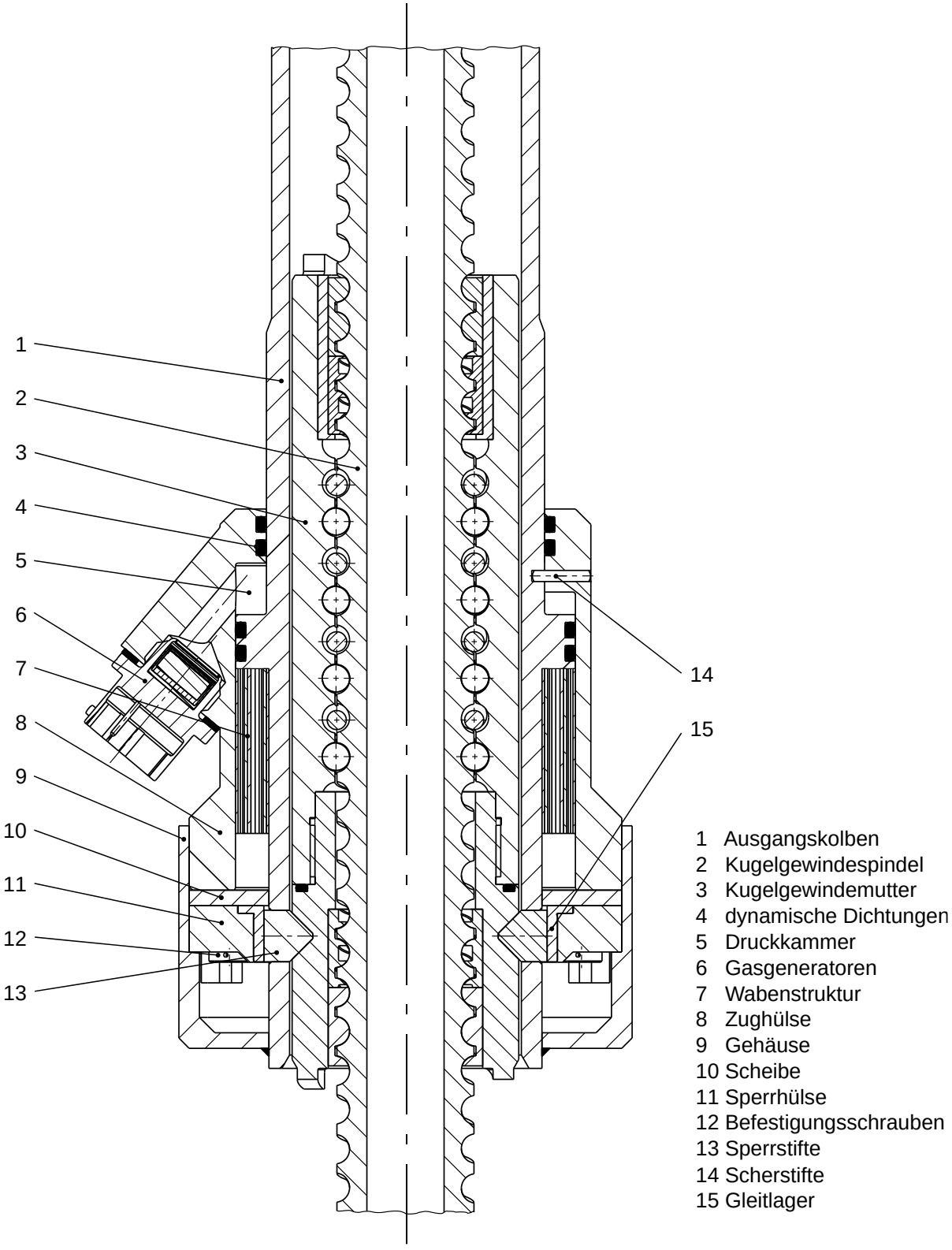


Bild 4.11: Irreversible Linearkupplung c) im gekoppelten Zustand

4.2.3.4 Irreversible Linearkupplung d)

Die irreversible Linearkupplung d) ähnelt der Variante a) und eignet sich ebenso für Gewindetriebe mit rotierender Mutter und linear bewegter Spindel. Da nach dem Entkuppeln vollständige Ein- und Ausfahrbewegungen des Antriebsstrangs gefordert werden, führt dieses Kupplungskonzept, wie in Kapitel 2.1.5 beschrieben, zu einem „2 x Hub“-Aktor. In Bild 4.12 ist die irreversible Linearkupplung d) im geschlossenen Zustand dargestellt, bei dem eine Spannbuchse (5) den Kraftfluss des elektromechanischen Aktors kraftschlüssig überträgt.

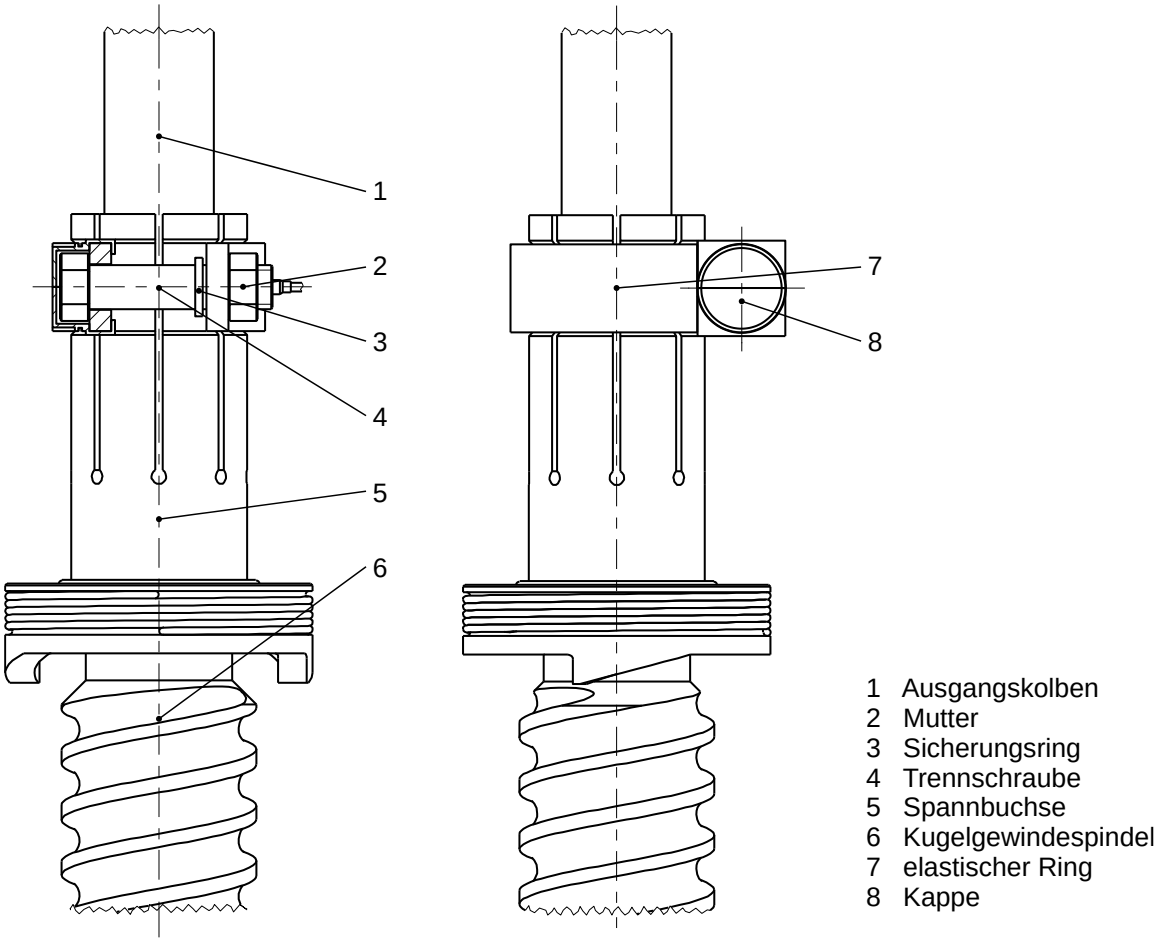


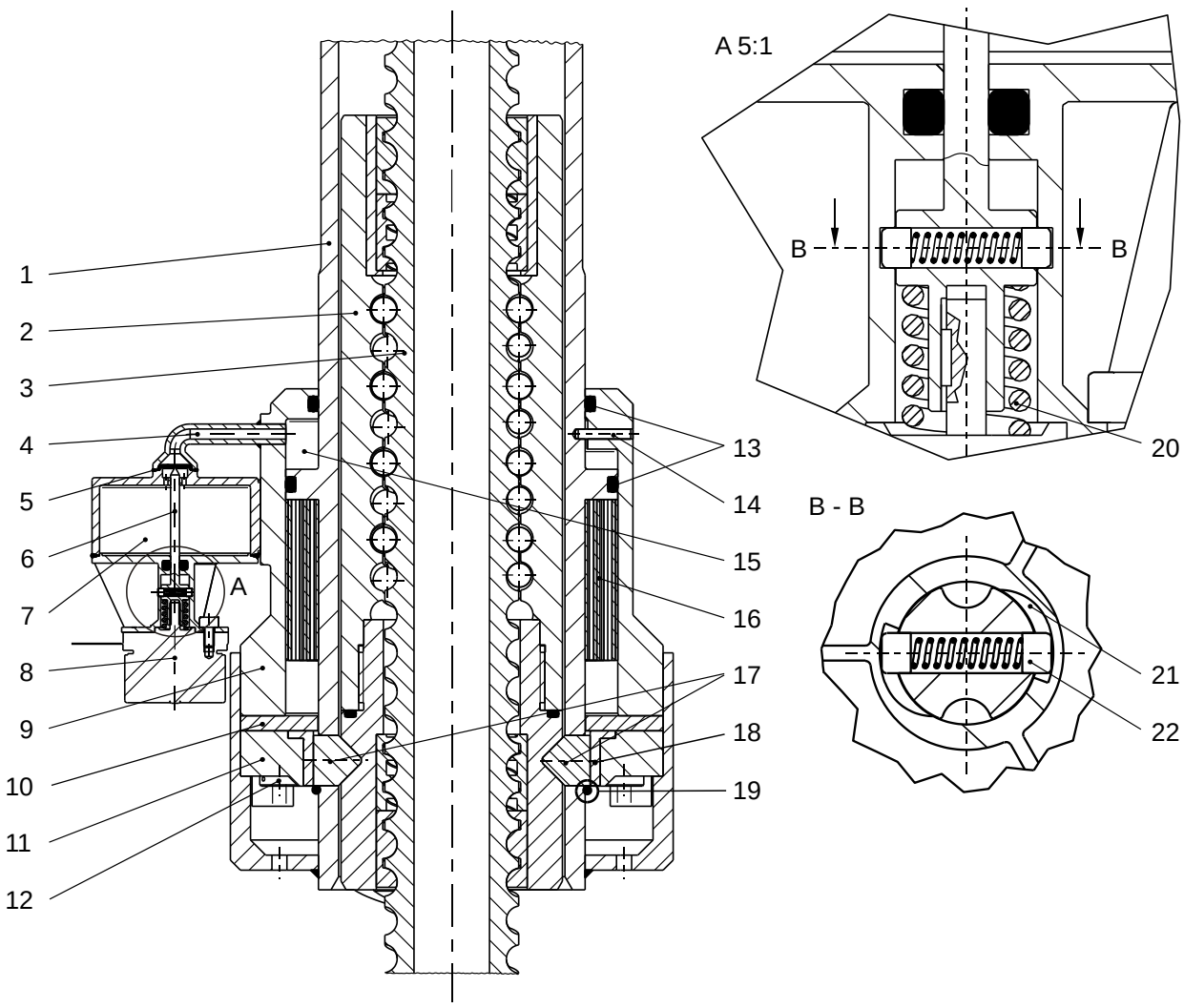
Bild 4.12: Irreversible Linearkupplung d) mit Spannbuchse und pyrotechnisch betätigter Trennschraube

Vorgespannt wird die Spannbuchse (5) mit Hilfe des elastischen Rings (7), der Mutter (2) und der Trennschraube (4). Im Unterschied zur Schneideeinheit der Linearkupplung a) weist die hier verwendete Trennschraube (4) eine intern schaltbare Mechanik auf, die nach elektrischer Zündung der Treibladung den generierten Gasdruck zum Entriegeln des Schraubenkopfs verwendet (siehe Kapitel 2.5). Mit der Aufhebung der Vorspannkräfte werden sowohl der elastische Ring (7) als auch die Spannbuchse (5) entlastet,

sodass die kraftschlüssige Verbindung der Spannbuchse (5) aufgehoben wird und der Antriebsstrang des elektromechanischen Aktors freigängig ist. Die Kappe (8) und der Sicherungsring (3) halten die Trennschraube (4) und Mutter (2) am elastischen Ring (7), der seinerseits an der Spannbuchse (5) formschlüssig verbleibt. Nach dem Entkuppeln wird der Ausgangskolben (1) innerhalb der hohlgebohrten Kugelgewindespindel (6) geführt.

4.2.3.5 Irreversible Linearkupplung e)

Alternativ zur pyrotechnisch betätigten Kupplung c) greift die irreversible Linearkupplung e), vgl. Bild 4.13, auf einen Drucktank (7) mit gespeicherter Druckluft und einem schnell schaltenden Ventil zurück. Im Vergleich zwischen den beiden Varianten spielen Temperaturschwankungen bei gespeicherter Druckluft eine entscheidendere Rolle, da diese bei konstantem Tankvolumen direkt zu Druckschwankungen führen. Während bei minimalem Druckniveau die Konstruktion noch sicher entkuppeln können muss, gilt der maximale Druck für die meisten Bauteile als dimensionierende Größe. Andererseits weist die pneumatische Variante kein potentielles Feuerrisiko aufgrund von pyrotechnischen Verbrennungsprodukten auf.



1	Ausgangskolben	7	Drucktank	13	dynamische Dichtungen	19	elastischer Ring
2	Kugelgewindemutter	8	Elektromotor	14	Scherstift	20	zylindrische Schraubenfeder
3	Kugelgewindespindel	9	Zughülse	15	Druckkammer	21	Nut
4	Verbindungsröhrchen	10	Scheibe	16	Wabenstruktur	22	Sperrelemente des Stifts
5	Berstscheibe	11	Sperrhülse	17	Sperrelemente		
6	gesperrter Stift	12	Befestigungsschrauben	18	Gleitlager		

Bild 4.13: Irreversible Linearkupplung e) inklusive Drucktank und betätigter Berstscheibe als schnell schaltendes Ventil

Das System „Mechanismus“ der irreversiblen Linearkupplung e) ist ähnlich dem der irreversiblen Linearkupplung c) aufgebaut. Zum Leiten des Kraftflusses sind Sperrelemente (17) zwischen Ausgangskolben (1) und Kugelgewindemutter (2) eingebaut, die mittels einer Sperrhülse (11) in Position gehalten werden. Zusammengeschraubt bilden Gleitlager (18), Sperrhülse (11), Scheibe (10) und Zughülse (9) eine mit Scherstiften (14) fixierte Hülsenbaugruppe. An ihr ist die Betätigungseinheit befestigt. Um die Linearkupplung zu entkoppeln, wird der Elektromotor (8) bestromt und seine Abtriebswelle soweit gedreht, bis die Sperrung des Stifts (6) aufgehoben wird. Hierfür ist die Nut (21) im Gehäuse derart gestaltet, dass die Sperrelemente des Stifts (22) während der Dreh-

bewegung radial nach innen gedrückt werden (siehe Detailansichten A und B - B). Die Federkraft der Schraubenfeder (20) treibt anschließend den Stift (6) nach oben, sodass das obere Stiftende die Berstscheibe (5) produktseitig durchstößt. Ausgangsseitig leitet ein Röhrchen (4) das Arbeitsmedium in die Druckkammer (15) der Kupplung. Sobald dort der Auslösedruck erreicht wird, werden zum einen die Scherstifte (14) gebrochen und zum anderen Haftreibungskäfte an der beschleunigenden Hülsenbaugruppe und ihren benachbarten Bauteilen überwunden. Mit der Hülsenbaugruppenbewegung löst sich die Sperrhülse (11) von den Sperrelementen (17), sodass diese freigegeben und aufgrund von extern wirkenden Kräften radial nach außen getrieben werden. Ein elastischer Ring (19) verhindert ungewolltes Zurückfallen der Sperrelemente (17) in ihre gekoppelten Positionen. Zur Absorption der verbleibenden kinetischen Energie fährt die Hülsenbaugruppe in eine vorgestauchte Wabenstruktur (16) aus Aluminium. Aufbauend auf diesem Konzept sind weitere Ausführungsvariationen in [EP2837556A1, EISWIRTH15] beschrieben.

4.2.3.6 Irreversible Linearkupplung f)

Bei Aktoren stehen chemische und pneumatische Energiespeicher, wie sie für die irreversiblen Linearkupplungen c) und e) verwendet werden, häufig in Konkurrenz zu mechanischen Alternativen. Für Letztgenannte zeigt Bild 4.14 die Linearkupplung f) im gekoppelten Zustand mit einer Schraubenfeder (10) als Energiespeicher und einem schnell schaltenden Pinpuller (5) als Freigabe- und Halteeinheit. Einerseits beeinflussen Umgebungsbedingungen, wie z. B. Temperatur- und Druckschwankungen, mechanische Energiespeicher vergleichsweise geringfügig. Auf der anderen Seite erhöhen sich üblicherweise deren Werte zu Kupplungsbauraum und -masse.

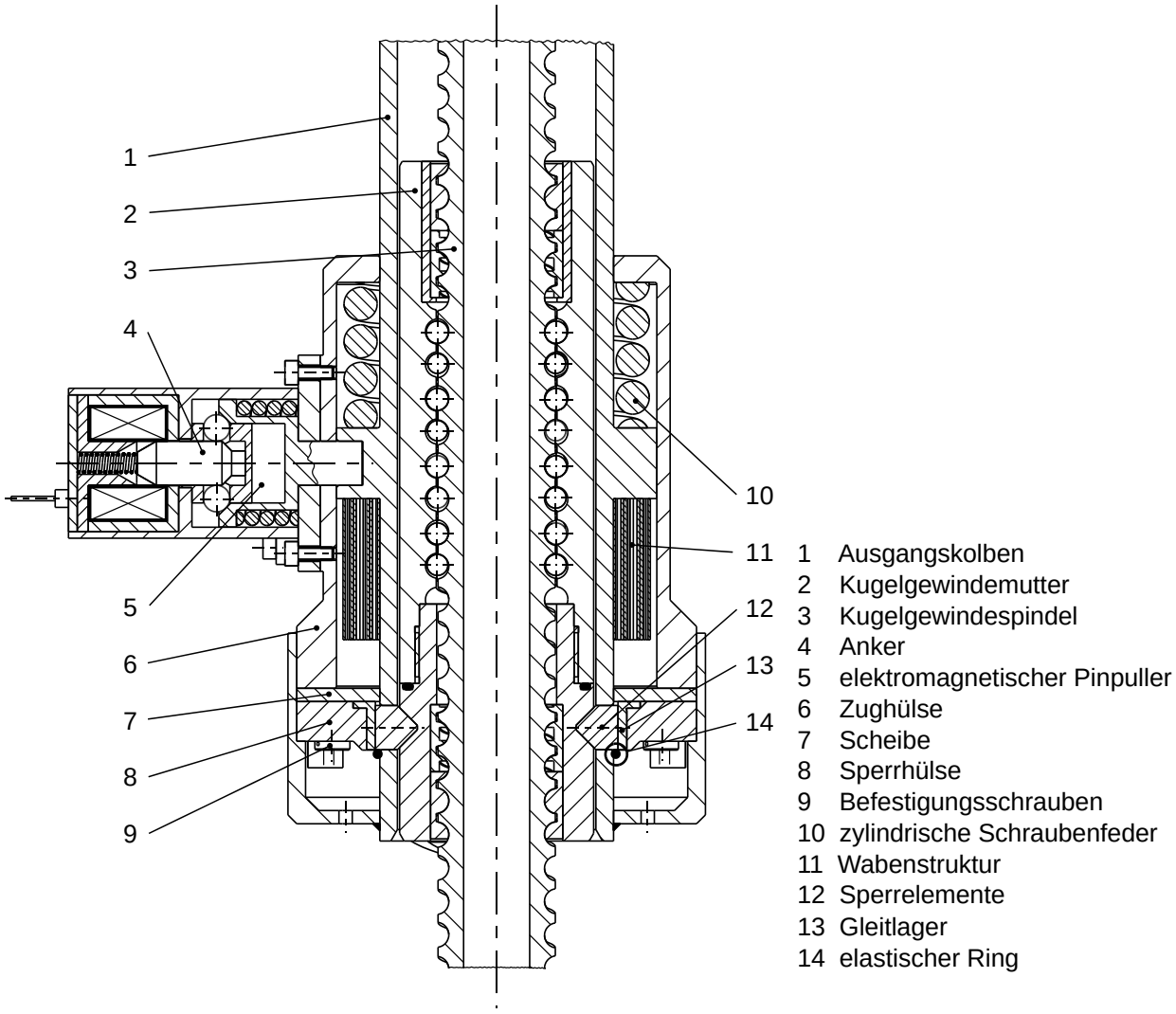


Bild 4.14: Irreversible Linearkupplung f) mit vorgespannter Schraubenfeder und elektromagnetischem Pinpuller als Halte- und Freigabeeinheit

Im gekoppelten Zustand der irreversiblen Linearkupplung f) leiten Sperrelemente (12) den Kraftfluss zwischen Ausgangskolben (1) und Kugelgewindemutter (2) und werden mit Hilfe einer Sperrhülse (8) fixiert. Die miteinander verschraubten Bauteile Gleitlager (13), Sperrhülse (8), Scheibe (7) und Zughülse (6) ergeben eine Hülsenbaugruppe, an deren oberem Ende eine vorgespannte Schraubenfeder (10) als Energiespeicher zwischen Zughülse (6) und Ausgangskolben (1) eingebaut ist. Gehalten wird die Hülsenbaugruppe durch den ausgefahrenen Stift des elektromagnetischen Pinpullers (5). Dieser Pinpuller (5) weist im Inneren seines Gehäuses einen mit redundanten Spulenwicklungen ausgeführten Elektromagneten und eine Halte- und Freigabemechanik inklusive des ausgefahrenen Stifts auf. Um den Entkoppelungsvorgang der Linearkupplung durchzuführen, werden die redundanten Spulenwicklungen bestromt, bis die Reluktanzkräfte des Elektromagneten den Anker (4) vollständig anziehen. Mit

dem Erreichen seiner neuen Position gibt der Anker (4) Kugeln in radialer Richtung und folglich den ausgefahrenen Stift in axialer Richtung frei. Kräfte einer vorgespannten Schraubenfeder führen zum Einfahren des Stifts, was dem Entriegeln der Hülsenbaugruppe vom Ausgangskolben (1) entspricht. Infolgedessen treiben die an der Zughülse (6) angreifenden Schraubenfederkräfte die Hülsenbaugruppe an, um die Sperrhülse (8) von den Sperrelementen (12) zu lösen und letztere radial freizugeben. Wirken weiterhin externe Kräfte auf den Antriebsstrang des elektromechanischen Aktors, treiben diese die Sperrelemente (12) aus ihren gekoppelten Positionen, während ein elastischer Ring (14) das ungewollte Zurückfallen der Sperrelemente (12) in ihre alten Positionen verhindert. Die restliche kinetische Energie der Hülsenbaugruppe wird mit Hilfe einer vorgestauchten Wabenstruktur (11) aus Aluminium aufgenommen und absorbiert.

4.2.4 Bewertung

Der letzte Schritt des Konzipierens umfasst die Bewertung der irreversiblen Konzepte, wofür diese ausreichend weit konkretisiert sein müssen. Als Grundlage für eine aussagekräftige Bewertung dienen qualitative und quantitative Bewertungskritierien, die anhand der Wünsche der Anforderungsliste[6] und der in der Projektausschreibung spezifizierten Kriterien festgelegt werden. Die Vorgehensweise bei dieser Bewertung entspricht der in Kapitel 4.1.4 beschriebenen Bewertung zu den reversiblen Linearkupplungen.

Tabelle 4.6 stellt die Bewertungsliste der irreversiblen Konzepte dar, in die für jedes Konzept quantitative und qualitative Eigenschaftsgrößen eingetragen werden. Die quantitativen Werte bezüglich der Kupplungsmassen und einhüllenden Bauräumen sind direkt aus den CAD-Modellen entnommen, während für die Berechnung der Schaltzeiten analytische Modelle und Daten aus Herstellerkatalogen zum Tragen kommen. Was die Testbarkeit anbelangt, lassen sich zumindest die elektrischen Zündkreisläufe der pyrotechnisch betätigten Konzepte a) – d) mit Hilfe eines Messstroms testen. Aufgrund der chemischen Prozesse sind jedoch ihre Treibladungen nicht zurücksetzbar. Die Eigenschaften der begrenzten funktionalen Testbarkeit und der Irreversibilität gelten ebenso für die Konzepte e) und f), wobei neben der Elektrik weitere Komponenten geprüft werden können. Konkret bedeutet dies, dass bei Konzept e) die Verfügbarkeit

[6] Die Forderungen der Anforderungsliste sind ohnehin zwingend von allen Lösungen zu erfüllen und werden separat mittels einer Spezifikation-Verträglichkeits-Matrix überwacht.

des Gasdrucks im Drucktank mit einem Sensor oder einer analogen Anzeige überwacht und bei Konzept f) der elektromagnetische Pinpuller vor dem Einbau in das Fluggerät oder während bestimmter Wartungsintervalle vollständig getestet und manuell zurückgesetzt werden kann. Um die Zuverlässigkeit der irreversiblen Konzepte zu bewerten, gelten die Nichtverfügbarkeiten vor, während und nach dem Entkuppeln als charakteristische Kenngrößen. Die eingetragenen Werte sind abgeschätzt und orientieren sich an Herstellerdaten. Bei der Bewertung der maximalen Umgebungstemperaturen kommen insbesondere Bedenken dahingehend auf, dass die Treibladungen bei den Konzepten a) – d) ungewollt durch die hohen Temperaturen initiiert werden könnten und damit die komplette Flugsteuerung unterbunden wird. Treibladungen wie ZPP weisen jedoch Aktivierungstemperaturen über 300 °C auf und garantieren eine uneingeschränkte Funktionsfähigkeit bis zu 180 °C, sodass prinzipiell pyrotechnische Betätigungen auch bei hohen Temperaturen geeignet sind. Die Abschätzung der Herstellkosten für potentielle Serienprodukte erfolgt wie in Kapitel 4.1.4 beschrieben und basiert im Wesentlichen auf Erfahrungswerten von bestehenden Serienprodukten und vorhandenen Prototypen. Weiterführend werden die qualitativen Eigenschaften diskutiert. Hier bezieht sich die einfache mechanische Integration auf den Zusammenbau der Kupplung und die notwendigen Änderungen der anderen Antriebsstrangkomponenten (analog zu Kapitel 4.1.4). Das folgende Kriterium zur einfachen Steuerung und zur einfachen Leistungselektronik deckt die Art und Anzahl der elektronischen Komponenten sowie den Aufwand bei den Steuerungen der Schaltprozesse ab. Beispielsweise ist das Anlegen einer Spannung über ein gewisses Zeitintervall – wie es bei pyrotechnischen Technologie der Fall ist – besser einzustufen als eine komplexere Regelung mittels eines Elektromotors. Hinsichtlich der Wartung reflektiert das nächste Bewertungskriterium die Anzahl der instand zu haltenden Bauteile, die Art und Weise der Wartungen, die Intervalllänge zwischen zwei planmäßigen Wartungen, die Einfachheit der Demontage sowie die Zugänglichkeit zu den Bauteilen. Generell sind die unterschiedlichen Sicherheitschecks nach behördlichen Vorgaben durchzuführen, während die Intervalllängen zwischen zwei Wartungen stark vom Luftfahrzeugtyp abhängen und von den Fluggesellschaften festgelegt werden. Die in den Konzepten a) – d) verbauten pyrotechnischen Treibladungen erfordern keine Wartung innerhalb der ersten 8 Jahre, danach sind sie durch neue pyrotechnische Baugruppen zu ersetzen. Bei der Bewertung des Entwicklungsrisikos wird insbesondere auf die gewählten Wirkprinzipien der Kupplungen geachtet (siehe Kapitel 4.1.4). Aus der ganzheitlichen Betrachtung aller

Bewertungskritierien folgt die Überlegung, ob der Schritt hin zu unkonventionellen Wirkprinzipien einzugehen ist oder nicht. Das letzte Kriterium berücksichtigt die qualitative Bewertung hinsichtlich der Bauteilkomplexität. Indirekt beeinflusst sie die Herstellkosten der Bauteile, den Aufwand hinsichtlich der Qualitätskontrollen und die Wechselwirkung mit den anderen Bauteilen.

Als bevorzugte Lösung setzt sich die irreversible Variante c) durch, die insgesamt am besten abschneidet (siehe [NAUBERT14B], S. 46f]). Zwar fällt die Punktedifferenz von 0,07 Punkten zur zweitplatzierten Variante f) relativ knapp aus, jedoch ist Variante c) im direkten Vergleich zur Variante f) insbesondere bei der leichten Bauart und bei den einfachen Bauteilen besser bewertet. Genau diese Kriterien unterstreichen die Vorteile der irreversiblen Linearkupplungen gegenüber reversiblen Linearkupplungen.

Bewertungskriterien			Eigenschaftsgrößen		irreversible Variante a)			irreversible Variante b)			irreversible Variante c)		
Nr.		Gew.		Einh.	Eigen-schaft	Wert	gew. Wert	Eigen-schaft	Wert	gew. Wert	Eigen-schaft	Wert	gew. Wert
1	leichte Bauart	0,13	Masse der Kupplung	kg	< 1,0	4	0,52	1,4	3	0,39	1,2	4	0,52
2	kompakter Bauraum	0,09	einhüllender Bau-raum	mm^3	$2{,}0 \cdot 10^5$	4	0,36	$1{,}0 \cdot 10^6$	4	0,36	$7{,}5 \cdot 10^5$	4	0,36
3	schnelles Entkup-peln	0,06	Schaltzeit für das Entkuppeln	ms	< 20	4	0,24	< 20	4	0,24	< 20	4	0,24
4	hoher Grad der Re-versibilität & Test-barkeit	0,14	Einstufung bzgl. Reversibilität & Testbarkeit	-	kein Reset & begrenzt funktional testbar	1	0,14	kein Reset & begrenzt funktional testbar	1	0,14	kein Reset & begrenzt funktional testbar	1	0,14
5	betriebssicheres Verhalten	0,12	Nichtverfügbarkeiten vor (8 Jahre), wäh-rend und nach dem Entkuppeln	-	$2{,}0 \cdot 10^{-6}$	1	0,12	$1{,}0 \cdot 10^{-6}$	2	0,24	$2{,}0 \cdot 10^{-7}$	4	0,48
6	gute Temperaturre-sistenz	0,03	maximale Betriebs-temperatur für 15 min	°C	180	0	0,00	180	0	0,00	180	0	0,00
7	einfache mechani-sche Integration	0,06	Aufwand zur mecha-nischen Integration	-	gering	3	0,18	mittel	2	0,12	gering	3	0,18
8	einfache Steuerung und Leistungselekt-ronik	0,02	Aufwand zur Steue-rung und Leistungs-elektronik	-	gering	3	0,06	gering	3	0,06	gering	3	0,06
9	wartungsarm	0,09	Wartungsaufwand	-	gering	3	0,27	mittel	2	0,18	gering	3	0,27
10	kostengünstig	0,08	Herstellkosten	€	2100	3	0,24	2500	2	0,16	2500	2	0,16
11	risikoarm bzgl. der Entwicklung	0,11	Entwicklungsrisiko	-	gering	3	0,33	gering	3	0,33	gering	3	0,33
12	einfache Bauteile	0,07	Bauteilkomplexität	-	gering	3	0,21	gering	3	0,21	gering	3	0,21
		1,00				32	2,67		29	2,43		34	2,95
				Rang			4			6			1

Tabelle 4.6: Bewertungsliste zu den irreversiblen Linearkupplungen

Nr.	Bewertungskriterien	Gew.	Eigenschaftsgrößen	Einh.	irreversible Variante d)			irreversible Variante e)			irreversible Variante f)		
					Eigenschaft	Wert	gew. Wert	Eigenschaft	Wert	gew. Wert	Eigenschaft	Wert	gew. Wert
1	leichte Bauart	0,13	Masse der Schaltkupplung	kg	< 1,0	4	0,52	< 1,0	4	0,52	1,5	2	0,26
2	kompakter Bauraum	0,09	einhüllender Bauraum	mm^3	$2{,}0 \cdot 10^5$	4	0,36	$8{,}0 \cdot 10^5$	4	0,36	$8{,}5 \cdot 10^5$	4	0,36
3	schnelles Entkuppeln	0,06	Schaltzeit für das Entkuppeln	ms	< 20	4	0,24	30	3	0,18	< 20	4	0,24
4	hoher Grad der Reversibilität & Testbarkeit	0,14	Einstufung bzgl. Reversibilität & Testbarkeit	-	kein Reset & begrenzt funktional testbar	1	0,14	kein Reset & begrenzt funktional testbar	1	0,14	manueller Reset & begr. funkt. testbar	2	0,28
5	betriebssicheres Verhalten	0,12	Nichtverfügbarkeiten vor (8 Jahre), während und nach dem Entkuppeln	-	$2{,}0 \cdot 10^{-6}$	1	0,12	$1{,}0 \cdot 10^{-6}$	2	0,24	$2{,}0 \cdot 10^{-7}$	4	0,48
6	gute Temperaturresistenz	0,03	maximale Betriebstemperatur für 15 min	°C	180	0	0,00	180	0	0,00	210	1	0,03
7	einfache mechanische Integration	0,06	Aufwand zur mechanischen Integration	-	gering	3	0,18	gering	3	0,18	gering	3	0,18
8	einfache Steuerung und Leistungselektronik	0,02	Aufwand zur Steuerung und Leistungselektronik	-	gering	3	0,06	mittel	2	0,04	sehr gering	4	0,08
9	wartungsarm	0,09	Wartungsaufwand	-	gering	3	0,27	mittel	2	0,18	gering	3	0,27
10	kostengünstig	0,08	Herstellkosten	€	2100	3	0,24	1800	4	0,32	2500	2	0,16
11	risikoarm bzgl. der Entwicklung	0,11	Entwicklungsrisiko	-	gering	3	0,33	mittel	2	0,22	gering	3	0,33
12	einfache Bauteile	0,07	Bauteilkomplexität	-	sehr gering	4	0,28	mittel	2	0,14	gering	3	0,21
		1,00				33	2,74		29	2,52		35	2,88
				Rang			3			5			2

Tabelle 4.6: Bewertungsliste zu den irreversiblen Linearkupplungen (Fortsetzung)

5 Entwurfsphase

Nach der Konzeptionsphase folgt das Entwerfen der Linearkupplungen. Diese Phase umfasst das konkrete Gestalten der prinzipiellen Lösungen, zu dessen Zweck detaillierte Auslegungsberechnungen notwendig sind. Die Kapitel 5.1 und 5.2 beinhalten Berechnungen und Analysen, die für die reversible und die irreversible Linearkupplung gleichermaßen gültig sind. Danach folgen die Beschreibungen der Entwürfe und die für die Ausführungsvarianten spezifischen Auslegungsberechnungen.

5.1 Festigkeitsnachweise der Sperrkugeln

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Festigkeitsnachweise basieren auf einem analytischen Modell zur Berechnung der Normalkräfte und den exakten Kontaktpositionen an den Sperrkugeln. Sowohl für statische als auch für dynamische Belastungen werden die mit den Normalkräften berechneten Hertz'schen Pressungen mit zulässigen Pressungen verglichen.

5.1.1 Berechnung der Kontaktkräfte

In Bild 5.1 ist eine Freischnittskizze der Kugelgewindemutter und zur besseren Übersicht nur eine von n Sperrkugeln dargestellt. Das initiale Koordinatensystem 0 liegt im Schwerpunkt S_M der Kugelgewindemutter, die die Axialkraft $\mathbf{F}_{ax}$ und das Drehmoment **T** an die Sperrkugeln überträgt. Die gesuchten Normalkräfte wirken an der Kugelgewindemutter im Kontaktpunkt A, am Ausgangskolben im Kontaktpunkt B und an der Sperrhülse im Kontaktpunkt C. Da die Sperrkugel in einer kegeligen Bohrung der Kugelgewindemutter sitzt, liegt der Kontaktpunkt A auf der gestrichelten Kreislinie.

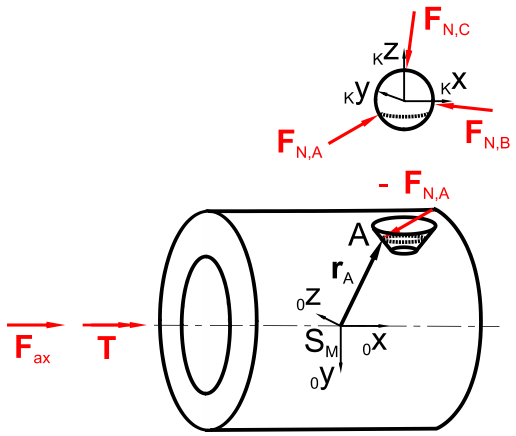


Bild 5.1: Freigeschnittene Kugelgewindemutter und exemplarisch eine von n Sperrkugeln

Zur Beschreibung der Normalkraft $\mathbf{F}_{N,A}$ werden die Koordinatensysteme K, 1 und 2 erstellt, deren Koordinatentransformationen in Bild 5.2 skizziert sind. Der Sinn dieser Koordinatentransformationen ist es, ein Koordinatensystem (hier: Koordinatensystem 2) zu definieren, in dem sich der Kraftvektor entlang einer Koordinatenachse (hier: $_2$x-Achse) darstellen lässt. Mit den Koordinatentransformationen kann anschließend der Kraftvektor in ein gewünschtes Koordinatensystem (hier: Koordinatensystem 0 bzw. Koordinatensystem K) zurückgeführt werden. Dies wird für die Berechnung der Kräfte- und Drehmomentsummen benötigt.

Je nach Kugelnummer wird das Koordinatensystem 0 um den Winkel α_i in $_0$x-Achsenrichtung gedreht[7], d. h. $\alpha_i \in [0\,°, 1/n \cdot 360\,°, 2/n \cdot 360\,°, \ldots, (n-1)/n \cdot 360\,°]$ mit den Kugelnummern i = [1, 2, 3, …, n], und anschließend um den Vektor $\mathbf{r}_{S_M S_K}$ (Ortsvektor vom Schwerpunkt der Kugelgewindemutter S_M zum Schwerpunkt der jeweiligen Kugel S_K) verschoben. Es folgen die Rotationen um β_A in $_K$z-Achsenrichtung und um γ_A in $_1$y-Achsenrichtung. Während sich der letzte Drehwinkel von $\gamma_A = 30\,°$ aufgrund der kegeligen Bohrung einstellt, ist der Drehwinkel β_A betriebsbedingt und Teil der gesuchten Kontaktposition.

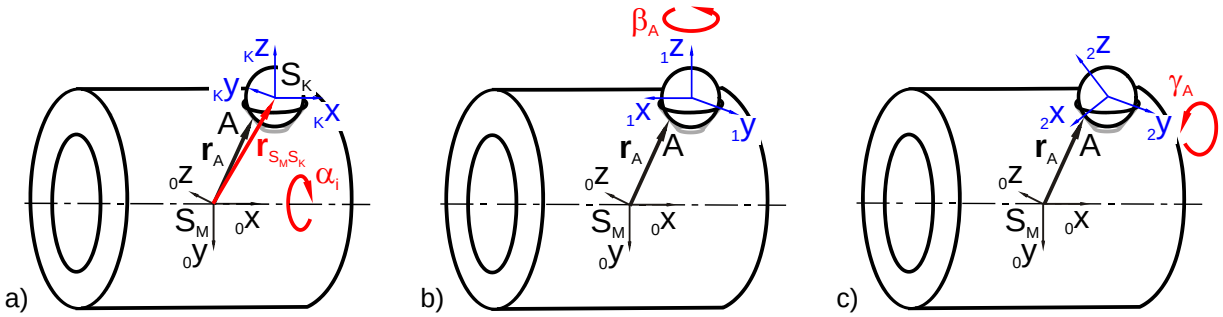


Bild 5.2: Skizze zu den Koordinatentransformationen; a) Koordinatentransformation von 0 nach K: Rotation um α_i in $_0$x-Achsenrichtung und Translation von S_M nach S_K, b) Koordinatentransformation von K nach 1: Rotation um β_A in $_K$z-Achsenrichtung, c) Koordinatentransformation von 1 nach 2: Rotation um γ_A in $_1$y-Achsenrichtung

[7] Exemplarisch ist in Bild 5.2 die dritte von 8 Kugeln mit $\alpha_3 = 90\,°$ skizziert (d. h. n = 8 und i = 3).

Zwischen den Koordinatensystemen lassen sich die Transformationsmatrizen, siehe Gleichungen (5.1), definieren[8]. Als Konvention steht der erste Index für das neue Koordinatensystem bzw. der zweite Index für das alte Koordinatensystem:

$$\mathbf{A}_{0K} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i \end{bmatrix}, \; \mathbf{A}_{K1} = \begin{bmatrix} \cos\beta_A & -\sin\beta_A & 0 \\ \sin\beta_A & \cos\beta_A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{5.1}$$

$$\mathbf{A}_{12} = \begin{bmatrix} \cos\gamma_A & 0 & \sin\gamma_A \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\gamma_A & 0 & \cos\gamma_A \end{bmatrix}$$

Die Normalkraft $\mathbf{F}_{N,A}$ zeigt entgegengesetzt der $_2$x-Achse und wird mittels der Transformationsmatrizen in den anderen Koordinatensystemen dargestellt. Gesuchte Größen sind der Normalkraftbetrag $F_{N,A}$ und der Drehwinkel β_A:

$$_2\mathbf{F}_{N,A} = \begin{bmatrix} -F_{N,A} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \; _1\mathbf{F}_{N,A} = F_{N,A} \begin{bmatrix} -\cos\gamma_A \\ 0 \\ \sin\gamma_A \end{bmatrix}, \; _K\mathbf{F}_{N,A} = F_{N,A} \begin{bmatrix} -\cos\beta_A \cdot \cos\gamma_A \\ -\sin\beta_A \cdot \cos\gamma_A \\ \sin\gamma_A \end{bmatrix}, \tag{5.2}$$

$$_0\mathbf{F}_{N,A} = F_{N,A} \begin{bmatrix} -\cos\beta_A \cdot \cos\gamma_A \\ -\sin\alpha_i \cdot \sin\gamma_A - \cos\alpha_i \cdot \sin\beta_A \cdot \cos\gamma_A \\ \cos\alpha_i \cdot \sin\gamma_A - \sin\alpha_i \cdot \sin\beta_A \cdot \cos\gamma_A \end{bmatrix}$$

Bild 5.3 zeigt eine Freischnittskizze der Sperrkugel mit den drei Normalkräften an ihren Kontaktstellen. Analog zu $\mathbf{F}_{N,A}$ lassen sich die Normalkräfte $\mathbf{F}_{N,B}$ und $\mathbf{F}_{N,C}$ in den Koordinatensystemen 1‘ und 2‘ bzw. 1‘‘ und 2‘‘ mit den Drehwinkeln β_B und γ_B bzw. β_C und γ_C definieren.

[8] Zu den Tansformationsmatrizen liefern nur die Rotationen jeweils einen nennenswerten Beitrag. Der Beitrag der Translation mit dem Vektor $\mathbf{r}_{S_M S_K}$ könnte mit der trivialen Einheitsmatrix angegeben werden.

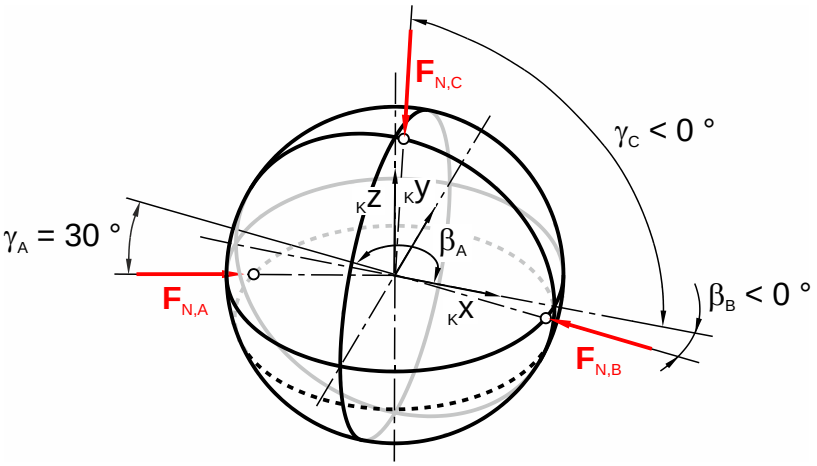


Bild 5.3: Freischnittskizze der Sperrkugel[9]

Der Kontaktpunkt B liegt geometriebedingt auf dem Äquator der Sperrkugel, sodass sich der Drehwinkel $\gamma_B = 0\ °$ ergibt. Sowohl der Drehwinkel β_B als auch der Normalkraftbetrag $F_{N,B}$ sind gesuchte Größen. In Kontaktunkt C stützt sich die Sperrkugel an der Sperrhülsenbohrung ab. Diese ist bei der reversiblen Linearkupplung leicht konisch ausgeführt, damit der Verschleiß während den schnell schaltenden Vorflugversuchen unter hohen Belastungen gering gehalten wird. Da die irreversible Linearkupplung nur einmal im Notfall betätigt wird, wird bei ihr auf diese verschleißreduzierende Maßnahme verzichtet. Der Winkel γ_C beträgt dann -90 °. Die Normalkräfte $\mathbf{F}_{N,B}$ und $\mathbf{F}_{N,C}$ sind mit den Gleichungen (5.3) und (5.4) in den relevanten Koordinatensystemen bestimmt.

$$ {}_{1'}\mathbf{F}_{N,B} = \begin{bmatrix} -F_{N,B} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad {}_{K}\mathbf{F}_{N,B} = -F_{N,B} \begin{bmatrix} \cos\beta_B \\ \sin\beta_B \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.3} $$

$$ {}_{2''}\mathbf{F}_{N,C} = \begin{bmatrix} -F_{N,C} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad {}_{K}\mathbf{F}_{N,C} = -F_{N,C} \begin{bmatrix} \cos\gamma_C \\ 0 \\ \sin\gamma_C \end{bmatrix} \tag{5.4} $$

Im nächsten Schritt wird die Summe aller an der Kugelgewindemutter angreifenden Kräfte gebildet. Durch die über den Umfang gleichmäßige Verteilung der Normalkräfte $\mathbf{F}_{N,A}$ heben sich deren ${}_0$y- und ${}_0$z-Komponenten gegenseitig auf.

[9] In Bild 5.3 ist der Kontakt in Punkt C für die reversible Linearkupplung dargestellt. Bei der irreversiblen Linearkupplung beträgt der Winkel γ_C exakt -90 °.

$$\sum {}_0\mathbf{F}_{KGM} = \mathbf{0}: \qquad \sum_{i=1}^{n}\left[-{}_0\mathbf{F}_{N,A}\right]_i + \mathbf{F}_{ax} = \mathbf{0}$$

$$\begin{bmatrix} n \cdot F_{N,A} \cos\beta_A \cdot \cos\gamma_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{ax} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.5}$$

Für die Berechnung der Summe aller Momente an der Kugelgewindemutter wird zunächst der Ortsvektor ${}_K\mathbf{r}_A$ vom Schwerpunkt der Kugelgewindemutter S_M zum Kraftangriffspunkt A definiert und mit Hilfe der Transformationsmatrix $\mathbf{A}_{0K}$ in das initiale Koordinatensystem 0 transformiert. Die Beiträge der Normalkräfte in A zum Momentengleichgewicht ergeben sich aus den Kreuzprodukten mit den jeweiligen Ortsvektoren ${}_0\mathbf{r}_A$ und den negativen Kraftvektoren. Hinzu addiert wird das zu übertragende Drehmoment **T** des Kugelgewindetriebs. Mit (5.5) und (5.7) stehen zwei Gleichungen für die beiden unbekannten Größen β_A und $F_{N,A}$ zur Verfügung.

$${}_K\mathbf{r}_A = \begin{bmatrix} \Delta x \\ 0 \\ R \end{bmatrix} + \mathbf{A}_{K1} \cdot \mathbf{A}_{12} \cdot \begin{bmatrix} r_K \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.6}$$

mit R: Abstand vom Kugelschwerpunkt zur Achse des Kugelgewindetriebs

Δx: Abstand zwischen Schwerpunkt der Kugelgewindemutter und der Kugel in ${}_0$x-Richtung

r_K: Kugelradius

$$\sum {}_0\mathbf{M}_{KGM}^{(S_M)} = \mathbf{0}: \qquad \sum_{i=1}^{n}\left[{}_0\mathbf{r}_A \times \left(-{}_0\mathbf{F}_{N,A}\right)\right]_i + \mathbf{T} = \mathbf{0}$$

$$\begin{bmatrix} -n \cdot F_{N,A} \cdot R \cdot \sin\beta_A \cdot \cos\gamma_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.7}$$

Das Drehmoment T in Gleichung (5.7) hängt dabei direkt von der Axialkraft F_{ax} ab, was mit dem Momentengleichgewicht am Kugelgewindetrieb (Gleichung (5.8), vgl. [NIEMANN05] S. 403) hergeleitet wird. Mit diesem Zusammenhang können alle gesuchten Größen in Abhängigkeit der gegebenen Axialkraft F_{ax} angegeben werden.

$$T = \frac{F_{ax} \cdot P_h}{2\pi \cdot \eta} \tag{5.8}$$

Ferner wird eine mögliche ungleichmäßige Kraftverteilung infolge von geometrischen Ungenauigkeiten durch den Anteilsfaktor k_φ berücksichtigt. Dieser hängt von Fertigungsabweichungen und dem Verschleiß an den Kontaktpunkten ab. Normierte Werte für Keilwellenverbindungen aus [NIEMANN05, S. 821] dienen als Anhaltswerte für den Anteilfaktor der Kupplung. Zusammen mit dem Anteilsfaktor k_φ ergeben sich folgende Ergebnisse für $F_{N,A}$ und β_A:

$$F_{N,A} = -\frac{F_{ax} \cdot k_\varphi}{n \cdot \cos\beta_A \cdot \cos\gamma_A} \tag{5.9}$$

$$\beta_A = \pi + \arctan\left(\frac{-P_h}{2\pi \cdot \eta \cdot R}\right) \tag{5.10}$$

Das Kräftegleichgewicht an der Kugel liefert die verbleibenden unbekannten Größen $F_{N,B}$, $F_{N,C}$ und β_B.

$$F_{N,B} = \frac{F_{ax} \cdot k_\varphi \cdot \tan\beta_A}{n \cdot \sin\beta_B} \tag{5.11}$$

$$F_{N,C} = \frac{F_{ax} \cdot k_\varphi \cdot \tan\gamma_A}{n \cdot \cos\beta_A \cdot \sin\gamma_C} \tag{5.12}$$

$$\beta_B = \arctan\left(\frac{\cos\gamma_A \cdot \sin\beta_A \cdot \tan\gamma_A}{\cos\beta_A \cdot \cos\gamma_A \cdot \tan\gamma_C + \sin\gamma_A}\right) \tag{5.13}$$

5.1.2 Festigkeitsnachweis bei statischer Belastung

Beim Festigkeitsnachweis mit statischer Belastung wird der Zustand betrachtet, bei welchem die Kupplung mit der Lastgrenze F_{limit} beansprucht wird. Die in Tabelle 1.1 gegebenen Parameter des Kugelgewindetriebs und der Last stammen aus der Anforderungsliste in Kapitel 3.2.10, während die gegebenen Parameter der Kupplung im Entwicklungsprozess variiert und festgelegt werden. Numerisch ergeben sich für die reversible Linearkupplung die in Tabelle 5.1 aufgelisteten Kontaktkräfte und -positionen an der Sperrkugel.

Gegebene Größen:				Gesuchte Größen:			
P	=	13,8	mm	$F_{N,A}$	=	9.655	N
η	=	90,0	%	$F_{N,B}$	=	8.409	N
R	=	22,5	mm	$F_{N,C}$	=	4.828	N
F_{ax}	=	50.000	N	β_A	=	173,8	°
k_φ	=	1,33	-	β_B	=	- 6,15	°
n	=	8	-				
γ_A	=	30	°				
γ_C	=	- 89,43	°				

Tabelle 5.1: Numerische Zahlenwerte für die Kontaktkräfte und Drehwinkel

Neben den Normalkraftbeträgen fließen Krümmungsdurchmesser und Werkstoffkenngrößen in die Berechnung der Hertz'schen Pressungen nach der Vorgehensweise in [NIEMANN05, S. 541ff] ein:

$$D_I = \frac{D_1 \cdot D_2}{D_1 + D_2} \tag{5.14}$$

$$D_{II} = \frac{D_3 \cdot D_4}{D_3 + D_4} \tag{5.15}$$

$$K = \frac{F_N}{(D_I / y)^2} \tag{5.16}$$

$$E' = \frac{2}{\left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)} \tag{5.17}$$

$$p_H = \frac{1}{\pi} \cdot \left(6 \cdot K \cdot E'^2 \right)^{1/3} \tag{5.18}$$

Der Beiwert y in Gleichung (5.16) ist dabei vom Verhältnis der Hauptkrümmungsdurchmesser D_I/D_{II} abhängig und wird aus den Tabellenwerten nach [NIEMANN05, S. 545] interpoliert (siehe Tabelle 5.2):

D_I/D_{II}	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2
y	1,0	0,9491	0,8963	0,8411	0,7830	0,7212	0,6545	0,5805	0,4947
D_I/D_{II}	0,15	0,10	0,08	0,06	0,04	0,02	0,01	0,008	0,006
y	0,4442	0,3843	0,3558	0,3231	0,2831	0,2279	0,1850	0,1732	0,1593
D_I/D_{II}	0,004	0,002	0,001	0,0005	0,0001	0,00009	0		
y	0,1421	0,1191	0,1017	0,0835	0,0414	0,0392	0		

Tabelle 5.2: Beiwert y zur Berechnung der Hertz'schen Pressung bei Punktberührung

Zu beachten ist, dass im Punkt A der konkave Krümmungsdurchmesser sich aus dem Kegelschnitt mit der Bohrung und der Hauptkrümmungsebene berechnen lässt. Der Krümmungsdurchmesser im Scheitel der resultierenden Parabel entspricht dem Kugeldurchmesser (D_K = 10 mm), wobei wie für die anderen Kontaktstellen zusätzliche Fertigungstoleranzen berücksichtigt werden. Das Spiel von 29 μm entspricht dem maximalen Wert einer H7/g6 Passung und ergibt die Krümmungsdurchmesser in den Gleichungen (5.19)[10].

$$\begin{aligned} D_{1,A} &= D_{1,B} = D_{1,C} = 10{,}000 \text{ mm} \\ D_{2,A} &= D_{2,B} = D_{2,C} = \infty \text{ mm} \\ D_{3,A} &= D_{3,B} = D_{3,C} = 10{,}000 \text{ mm} \\ D_{4,A} &= D_{4,B} = D_{4,C} = -10{,}029 \text{ mm} \end{aligned} \tag{5.19}$$

Für die Elastizitätsmoduln und Querkontraktionszahlen werden die Werte von Stahl für den Adapter, die Kugelgewindemutter und die Sperrhülse bzw. die Werte der technischen Keramik Si_3N_4 für die Sperrkugeln verwendet (d. h. E_1 = 305.000 N/mm², ν_1 = 0,26, E_2 = 210.000 N/mm² und ν_2 = 0,30). Die Hertz'schen Pressungen ergeben:

$$\begin{aligned} p_{H,A} &= 2.840 \text{ N/mm}^2 \\ p_{H,B} &= 2.712 \text{ N/mm}^2 \\ p_{H,C} &= 2.254 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \tag{5.20}$$

Sie dürfen jeweils die zulässige Hertz'sche Pressung bei statischen Belastungen nicht überschreiten, welche durch die maximale bleibende Verformung von δ_b/D_W = 0,01 % festgelegt ist und für alle drei Kontaktpunkte $p_{H,zul}$ = 3.354 N/mm² beträgt.

5.1.3 Festigkeitsnachweis bei dynamischer Belastung

Im Hinblick auf die Lebensdauerberechnung wirken hoch dynamische Belastungen auf die Kupplung, die per Referenzflugprofil mit Flugmanövern spezifiziert sind. Selbst die Belastung des Limitmanövers ($F_{ax,o}$ = 20 kN, schwellend, f_F = 30 Hz) tritt im Laufe eines Hubschrauberlebens so häufig auf, dass die Kupplung für diese als dauerfest auszulegen ist. Eine kurze Begründung hierfür ergibt der Vergleich zwischen der

[10] $D_{1,A}$, $D_{1,B}$, $D_{1,C}$, $D_{2,A}$, $D_{2,B}$ und $D_{2,C}$ sind die Krümmungsdurchmesser in Tiefenrichtung der Bohrungen. $D_{3,A}$, $D_{3,B}$, $D_{3,C}$, $D_{4,A}$, $D_{4,B}$ und $D_{4,C}$ sind die Krümmungsdurchmesser in Umfangsrichtung der Bohrungen.

Lastwechselgrenze für Dauerfestigkeit von 10^6 und der berechneten Gesamtlastwechselanzahl n_{LM} für das Limitmanöver mit Hilfe der Lastfrequenz f_F = 30 Hz (siehe Anforderungsliste in Kapitel 3.2.10), der Zeitdauer des Limitmanövers pro Referenzflug t_{LM} = 50 s/Flug (siehe Anforderungsliste in Kapitel 3.2.10), der durchschnittlichen Anzahl von Flügen pro Jahr $n_{F/a}$ = 1770 Flüge/Jahr (konservatives Beispiel nach [HUBER11]) und der durchschnittlichen Lebensjahre eines Hubschraubers L = 30 Jahre (konservative Abschätzung):

$$n_{LM} = f_F \cdot t_{LM} \cdot n_{F/a} \cdot L = 7{,}97 \cdot 10^7 > 10^6 \tag{5.21}$$

Die Berechnung der Hertz'schen Pressungen für dynamische Belastungen erfolgt analog zu den Kapiteln 5.1.1 und 5.1.2 und ergibt mit der oberen axialen Kraft $F_{ax,o}$ die Werte in den Gleichungen (5.22).

$$\begin{aligned} p_{H,A} &= 2.092 \quad N/mm^2 \\ p_{H,B} &= 1.998 \quad N/mm^2 \\ p_{H,C} &= 1.661 \quad N/mm^2 \end{aligned} \tag{5.22}$$

Die zulässigen Hertz'schen Pressungen $p_{H,dyn,zul}$ bei dynamischen Belastungen sind werkstoffabhängige Größen und betragen beispielsweise 2.200 N/mm² für 100Cr6 und 2.800 N/mm² für Cronidur 30. Da die zulässigen Werte für gängige Wälzlagerwerkstoffe über den berechneten Hertz'schen Pressungen liegen, ist folglich Dauerfestigkeit in Bezug auf das Flugprofil gegeben.

5.2 Analyse zu Schwingungsverschleiß

Neben Materialermüdung stellt Schwingungsverschleiß eine zu untersuchende Versagensart für die kraftübertragenden Bauteile beider gewählten Kupplungskonzepte dar. Ursache hierfür sind vor allem hoch dynamische Belastungen, die an stillstehenden, sich berührenden Bauteilen auftreten und aufgrund von Verformungen bereichsweise oszillierende Gleitbewegungen zur Folge haben. An den betroffenen Bereichen werden die Haftreibungsspannungen örtlich von den Schubspannungen überwunden.

Bild 5.4 zeigt als Beispiel eine Kontaktstelle eines Kugellageraußenrings, an der die äußere Gleitzone Schwingungsverschleiß aufweist, während die innere Haftzone unbeschädigt bleibt.

Bild 5.4: Schwingungsverschleiß am Außenring eines Kugellagers [SOMMER10, S. 152] mit unbeschädigter innerer Haftzone und beschädigter äußerer Gleitzone[11]

In [SOMMER10, S. 119ff] werden zur Beschreibung der Schwingungsverschleißsysteme die drei Systemklassen reversierender Gleitverschleiß, Schwingungsverschleiß (gross slip) und Schwingungsverschleiß (partial slip) in Abhängigkeit von der Schwingungsweite definiert. Beim reversierenden Gleitverschleiß liegt die Schwingungsweite oberhalb der charakteristischen Länge der Kontaktfläche, sodass Verschleißpartikel kontinuierlich abtransportiert werden. Ist die Schwingungsweite kleiner als die charakteristische Länge der Kontaktzone, tritt Schwingungsverschleiß auf. Ein Teil der Kontaktflächen überdeckt sich in diesem Fall ständig, wodurch der Abtransport der Verschleißpartikel gehemmt wird. Im Gegensatz zum Schwingungsverschleiß (gross slip) entsteht der Schwingungsverschleiß (partial slip) durch besonders kleine Schwingungsweiten, bei denen sich im Inneren der Kontaktzone eine unbeschädigte Haftzone bildet. Der Verschleiß ist, wie in Bild 5.4 dargestellt, auf die Gleitzone des Verschleißsystems begrenzt und führt zu vergleichsweise geringen spezifischen Verschleißraten. In dieser Gleitzone sind Verschleißmechanismen wie Adhäsion, Abrasion, Triobooxidation und Oberflächenzerrüttung zu erkennen, die sich u. a. durch Abscherungen von Mikroverschweißungen, Rissbildungen, abrasiv wirkenden Oxide, oxidative Vorgänge nach kontinuierlichem Abrieb chromreicher Passivierungsschichten und Furchungen auszeichnen. An den Sperrkugeln der beiden ausgewählten Linearkupplungen kann aufgrund der nicht funktionserforderlichen Schwingungsbewegungen die Klasse des Schwingungsverschleißes (partial slip) zugeordnet werden.

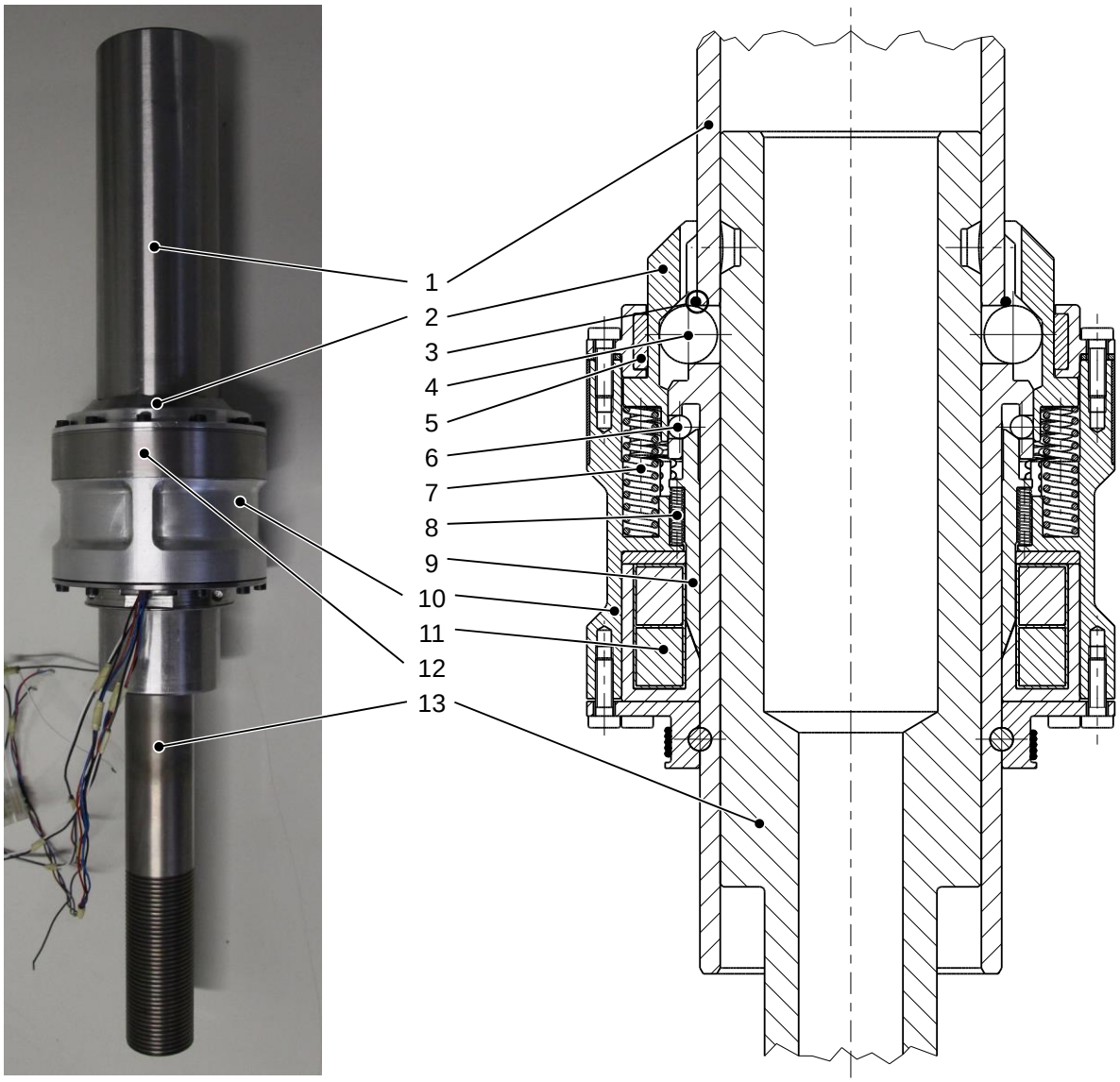
[11] Die äußerste Einflusszone ist im Bild 5.4 nicht mehr erkennbar.

Zur Vermeidung des Schwingungsverschleißes bieten sich Beschichtungen, die Verwendung von Keramikkugeln, die Erhöhung von Druckeigenspannungen in den Bauteilen und der Einsatz eines passenden Schmierstoffs als Abhilfemaßnahmen an. Bei Beschichtungen stellt sich die Materialpaarung mit Stahl und der DLC-Beschichtung Triondur C+ / CX+ [SCHAEFFLER13, S.21] als attraktive Lösung heraus, da neben der Vermeidung des Schwingungsverschleißes eine geringe Haftreibung auftritt. Dies korreliert mit der Auslegung des Kupplungsantriebs und hat eine kompakte und leicht bauende Konstruktion zur Folge. Bei Keramikkugeln hat sich das Siliziumnitrid Si_3N_4 als Wälzkörpermaterial für Hybridlager und Kugelgewindetriebe bewährt. Fehlermoden, wie beispielsweise das Abblättern der Beschichtung, entfallen, sodass Keramikkugeln im Vergleich zu Beschichtungen die robustere Lösung sind. Da sich die mechanischen Schnittstellen für die gewählten Kupplungskonzepte nicht passend abdichten lassen, kommen Flüssig- und Gasschmierung nicht in Betracht.

5.3 Reversible fremdbetätigte Linearkupplung

5.3.1 Aufbau und Funktionsweise

Ausgehend von der reversiblen Variante c) (siehe Kapitel 4.1.3.3) beinhaltet die Entwurfsphase der reversiblen Linearkupplung das konkrete Gestalten der prinzipiellen Lösung. Hierzu zeigt Bild 5.5 den Prototyp im gekoppelten Zustand (links) und ein Schnittbild des CAD-Modells im entkoppelten Zustand (rechts). Insbesondere wurde hier der Hall-Sensor (12) zur Erfassung des Zustandes „gekoppelte Kupplung“ bzw. „entkoppelte Kupplung“ ergänzt.



1 Ausgangskolben
2 Sperrhülse
3 elastischer Ring
4 erstes Kugelpaket
5 Führung
6 zweites Kugelpaket
7 äußere Schraubenfedern
8 innere Schraubenfedern
9 Ankerhülse
10 Kupplungsgehäuse
11 Elektromagnet
12 Hall-Sensor
13 Kugelgewindetrieb (Dummy)

Bild 5.5: Reversible fremdbetätigte Linearkupplung: Prototyp im gekoppelten Zustand (links), Schnittdarstellung im entkoppelten Zustand (rechts)

Die wesentlichen Inhalte des konkreten Gestaltens sind im Folgenden aufgelistet:

- Überarbeiteter Elektromagnet mit redundanten Spulen (11)
- Konkrete Gestaltung des Hall-Sensors (12)
- Mehrere, auf dem Umfang verteilte Schraubenfedern anstelle von zwei großen Schraubenfedern (7) und (8)
- Führung der Sperrhülse am Kupplungsgehäuse (5)

- Elastischer Ring (3) zur Fixierung des ersten Kugelpakets (4) anstelle des Halteelements und der Sternfedern
- Verdrehsicherung für die Sperrhülse (2) realisiert mittels eines Längsstifts[12]

Da der Prototyp primär für die Funktionsnachweise der Kupplung gestaltet ist und die Funktion des Kugelgewindetriebs dafür keine entscheidende Rolle spielt, ist der Kugelgewindetrieb als „Dummy"-Körper (13) realisiert.

Im geschlossenen Zustand leitet das erste Kugelpaket (4) den axialen Kraftfluss. Zur radialen Abstützung ist die eingefahrene Sperrhülse (2) über das Kugelpaket (4) geschoben. In dieser Stellung wird die Sperrhülse (2) selbst mit Hilfe des zweiten Kugelpakets (6) fixiert, während die äußeren Schraubenfedern (7) vorgespannt an der Sperrhülse (2) angreifen. Zum Entkuppeln werden beide redundanten Spulen des Elektromagneten (11) gleichzeitig bestromt, sodass die wirkende magnetische Kraft die Ankerhülse (9) anzieht und das zweite Kugelpaket (6) radial freigegeben wird. Die gespeicherte mechanische Energie der äußeren Schraubenfedern (7) beschleunigt die Sperrhülse (2), sorgt für deren Ausfahrbewegung und entriegelt damit das erste Kugelpaket (4). Axiale Kräfte auf den Antriebsstrang bewirken das radiale Verschieben des ersten Kugelpakets (4) und das Entkuppeln des Antriebsstrangs. Der elastische Ring (3) verhindert ein ungewolltes Zurückfallen des ersten Kugelpakets (4). Im Rahmen der Funktionsnachweise erfolgt das Zurücksetzen der Linearkupplung manuell, wohingegen bei automatisierten Vorflugversuchen die folgende Vorgehensweise vorgeschlagen wird:

1. Wähle die zu testende Linearkupplung aus
2. Setze den elektromechanischen Aktor in eine beliebige Position
3. Verspanne die Linearkupplung mit Hilfe der redundanten elektromechanischen Aktoren
4. Betätigte die Linearkupplung
5. Überprüfe das Entkuppeln mit Hilfe des Hall-Sensors (12)
6. Fahre die Kugelgewindemutter (13) des entkoppelten Antriebsstrangs vollständig aus
7. Fahre den Ausgangskolben (1) des entkoppelten Antriebsstrangs mit Hilfe der redundanten elektromechanischen Aktoren vollständig aus

[12] In Bild 5.5 (rechts) liegt der Längsstift nicht in der Schnittebene des CAD-Modells.

8. Halte eine kleine Vorspannkraft zwischen den Sperrkugeln (4) und der Außenfläche der Kugelgewindemutter (13) aufrecht
9. Fahre die Kugelgewindemutter (13) bis zum Einrasten der Sperrkugeln (4) langsam ein
10. Überprüfe das Einkuppeln mit Hilfe des Hall-Sensors (12) und durch Verfahren des elektromechanischen Aktors
11. Falls noch nicht alle Linearkupplungen getestet sind, springe zu 1. Zurück

Nach den Optimierungsschritten beträgt die Masse der reversiblen Linearkupplung 1,58 kg. Dieser Wert umfasst die in Bild 5.5 dargestellte Baugruppe ohne die Massen des Ausgangskolbens (1) und des Kugelgewindetriebs (13), da die beiden zuletzt genannten Bauteile nach Anforderung 3.6 bei der Massenberechnung auszuschließen sind. Die Kupplungsmasse liegt somit zwischen dem geforderten und dem gewünschten Massewert und erfüllt die Anforderung 3.6.

Nach Festlegung aller Toleranzen und Werkstoffe sowie deren Wärmebehandlungen belaufen sich die Herstellkosten pro Prototyp auf ca. 1640 €. Sie enthalten alle Kosten zur Herstellung der Bauteile, für die Zukaufteile, zum Zusammenbau und zur Prüfung der Baugruppe. Eine Prognose für potentielle Serienprodukte zwischen 101 und 1000 Stück ergibt eine Reduktion der Herstellkosten pro Baugruppe auf ca. 1140 € (siehe [TORO15B]). Beide Kostenwerte liegen weit unterhalb des geforderten Wertes, sodass Anforderung 9.1 erfüllt ist.

Des Weiteren ergibt die Analyse in [TORO15A] zur Betriebssicherheit der Kupplung, dass ein ungewolltes Auslösen mit der Wahrscheinlichkeit von $1{,}65 \cdot 10^{-7}$ Fehler pro Flugstunde und ein fehlerhaftes Entkuppeln mit der Wahrscheinlichkeit von $1{,}23 \cdot 10^{-7}$ Fehler pro Flugstunde auftritt. Der Verlust der Testbarkeit und die Fehler ohne funktionalen Effekt werden mit $5{,}12 \cdot 10^{-8}$ Fehler pro Flugstunde beziehungsweise $1{,}15 \cdot 10^{-7}$ Fehler pro Flugstunde prognostiziert. Die Ergebnisse der Analyse erfüllen die Anforderung 5.2.

5.3.2 Auslegung des Elektromagneten

Durch die Trennung der Antriebe für Ent- bzw. Einkuppelvorgänge kann der Elektromagnet speziell für das schnell schaltende Öffnen der Kupplung entwickelt werden. Dieses Kapitel beinhaltet sowohl die Kernpunkte der Gestaltung des Elektromagneten als auch einen Auslegungsnachweis, bei dem die magnetische Kraft in Abhängigkeit von der Ankerposition mittels der Finite-Elemente-Methode berechnet wird. Als Ein-

gangsgröße fließt eine Kennlinie des Antriebs in die Dynamikberechnung der bewegten Kupplungsbauteile mit ein, sodass die Anforderung 2.2 zur maximalen Schaltzeit rechnerisch nachgewiesen wird.

Die wesentlichen Gestaltungsziele für den Elektromagneten lassen sich in folgende Punkte gliedern:

- konstant verlaufende Magnetkraft-Stellweg-Kennlinie
- ähnlich große Antriebskräfte bei Ein- und Zweispulenbetrieb
- kompakte und leicht bauende Aktorkomponenten

Als Ausgangsmodell zur Beschreibung von Elektromagneten dient die Maxwellsche Zugkraftformel, bei der die Reluktanzkraft indirekt proportional vom Quadrat des Luftspaltes abhängig ist. Im Gegensatz zu diesem Modell erfordert die Anwendung die größte Antriebskraft, wenn die Haftreibung zwischen Ankerhülse und zweitem Kugelsatz im ausgefahrenen Zustand des Elektromagneten überwunden wird. Als Gestaltungsziel wird eine konstant verlaufende Magnetkraft-Stellweg-Kennlinie festgelegt, für die sich nach [KALLENBACH12, S. 73ff] die geometrische Kennlinienbeeinflussung mit speziell gestalteten Anker-Ankergegenstück-Systemen eignet. Nach ersten Analysen wird die Konstruktion mit konischem Anker und Eisenkern aufgrund der kompakten und einfachen Bauweise bei gefordertem Innendurchmesser weiter verfolgt. Der Konuswinkel hebt die Magnetkraft-Stellweg-Kennlinie für große Stellwege an, während die Sättigung der weichmagnetischen Anker- und Eisenkernwerkstoffe das Herabsenken der Kennlinie für kleine Stellwege zur Folge hat.

Ein weiteres Ziel der Gestaltung beinhaltet, dass beim Ein- und Zweispulenbetrieb der Elektromagnet ähnlich große Antriebskräfte aufbaut. Hintergrund hierfür ist, dass im Fall des mechanischen Klemmens immer beide Spulen bestromt werden, aber nur eine der beiden Spulen für einen sicheren Betrieb funktionieren muss. Weist der Elektromagnet für den Zweispulenbetrieb ein ähnlich großes Kraftniveau wie für den Einspulenbetrieb auf, so bleiben die durch die Aktorik hervorgerufenen Bauteilbelastungen gleich groß. Realisiert wird dies, indem Eisenkern und Anker bereits für große Luftspalte im Sättigungsbereich betrieben werden. In diesem Zustand bewirkt eine größere magnetische Durchflutung der Spulen eine geringe Erhöhung des magnetischen Flusses. Die Magnetkräfte des Antriebs sind somit für beide Betriebsmodi ähnlich groß.

Hinsichtlich des dritten Gestaltungsziels können vor allem die Spulen des Elektromagneten kompakt und leicht bauend gestaltet werden, da sie wegen der sehr kurzen Einschaltzeiten und vergleichsweise langen Ausschaltzeiten mit sehr hohen Stromdich-

ten angesteuert werden dürfen. Begrenzend für die Stromdichten ist das instationäre Aufheizen der Spulen durch die Ohm'schen Verluste, wobei typische Werte für Stromdichten bei einer Einschaltdauer von 5 %, z. B. nach [KALLENBACH12, S. 284], für diese Anwendung als zu konservativ angesehen werden[13]. Werden Konvektion und Wärmeleitung vernachlässigt, lässt sich die maximale Spulentemperatur mit der Gleichung (5.23) berechnen (siehe [NAUBERT15A, S.19]).

$$T_{Spule,max} = \frac{R \cdot I^2 \cdot t_{on}}{m_{Spule} \cdot c_{P,Spule}} + T_{U,max} \tag{5.23}$$

Um den maximalen Betriebstemperaturen $T_{Spule,max}$ von ca. 300 °C standzuhalten, kommen bandagierte Spulen mit spezieller Isolierung zum Einsatz. Neben den Spulen werden Bauraum und Masse des Elektromagneten vorwiegend durch die Anker- und Eisenkernwerkstoffe beeinflusst. Die folgenden Ergebnisse basieren auf dem Schnellarbeitsstahl 1.3343.

Um die Gestaltungsziele zu überprüfen, werden Finite-Elemente-Berechnungen durchgeführt und die berechneten Ergebnisse zur Magnetkraft-Stellweg-Kennlinie zusammengefasst. Die Haftreibungszahl zwischen Anker und zweitem Kugelsatz, die für die Bestimmung der erforderlichen Magnetkraft benötigt wird, basiert auf der Werkstoffpaarung Si_3N_4 und 100Cr6 und ist der Quelle [VOGT01, S. 58] entnommen. Grundlage für die numerischen Berechnungen sind die Gleichungen der Magnetostatik, die für rotationssymmetrische Aufgaben in Zylinderkoordinaten aufgestellt werden und eine unbekannte Komponente des Vektorpotentials **A** pro Knoten aufweisen.

Wirbelströme, die in elektrisch leitenden Werkstoffen induziert werden und den magnetischen Feldaufbau verzögern, werden nicht modelliert, da wesentliche Einflüsse auf das Simulationsergebnis erst für Schaltzeiten kleiner 5 ms zu erwarten sind (siehe [NAUBERT15A, S. 17]). Nichtlineare Materialgesetze der weichmagnetischen Anker- und Eisenkernwerkstoffe sind in Form von B-H-Kennlinien tabellarisch hinterlegt, die jeder magnetischen Feldstärke direkt eine magnetische Flussdichte zuweisen. Während diese Modellierungsart Sättigungseffekte erfasst, bleibt die Abhängigkeit vom vorherigen Magnetisierungszustand des Werkstoffes in Form einer Hysterese unberücksichtigt. Diese Vernachlässigung ist für Werkstoffe mit schmalen Hystereseschleifen vertretbar.

[13] Für Einschaltdauern kleiner 1 % werden in [KALLENBACH12, S. 284] keine Angaben mehr gemacht.

Nach iterativer Berechnung der magnetischen Flussdichte im Simulationsgebiet für vorgegebene Stromdichten der Spulen und Stellwege ergibt die integrale Auswertung des Maxwell'schen Spannungstensors auf der Ankeroberfläche die Magnetkraft.

Bild 5.6 zeigt ein Konturdiagramm, das den magnetischen Flussdichtebetrag in der Schnittebene des Elektromagneten darstellt.

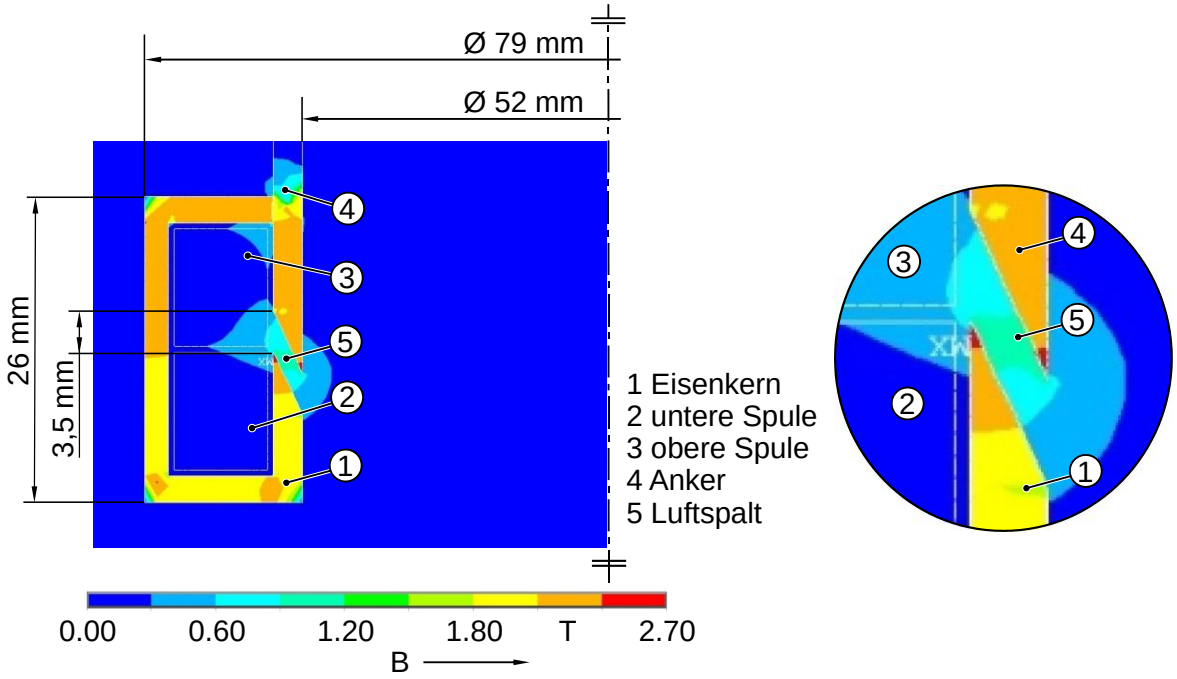


Bild 5.6: Betrag der magnetischen Flussdichte in der Schnittebene des Elektromagneten bei ausgefahrenem Anker und bestromter oberer Spule (links), vergrößerte Ansicht des Luftspalts (rechts)

Bei diesem exemplarisch dargestellten Simulationsergebnis befindet sich der Anker in ausgefahrener Position, d. h. bei einem Stellweg x_S = 3,5 mm, während die obere Spule mit maximalem Strom $I_1 = I_{max}$ = 33 A angesteuert wird. Zwischen den kegelförmigen Abschnitten von Anker und Eisenkern verläuft der magnetische Fluss überwiegend senkrecht zu den Oberflächen und legt im Luftspalt einen kleineren Weg als den Stellweg zurück. Die damit verbundene Reduktion des magnetischen Widerstandes im Luftspalt führt zu einer Erhöhung der magnetischen Flussdichte. Neben einer vergrößerten axialen Magnetkraft für große Stellwege entstehen magnetische Kräfte senkrecht zur Anzugsrichtung, die sich bei perfekter Rotationssymmetrie kompensieren. Eine vollständige Kompensation der Radialkräfte ist bei realen Elektromagneten mit Fertigungstoleranzen allerdings nicht zu erwarten.

Des Weiteren zeigt das Konturdiagramm, dass die kegelförmigen Absätze des Ankers und Eisenkerns überwiegend magnetisch gesättigt sind. Bei kleineren Stellwegen sind

die kegelförmigen Absätze ebenfalls gesättigt, sodass die Magnetkraft-Stellweg-Kennlinie in Bild 5.7 nahezu konstant verläuft.

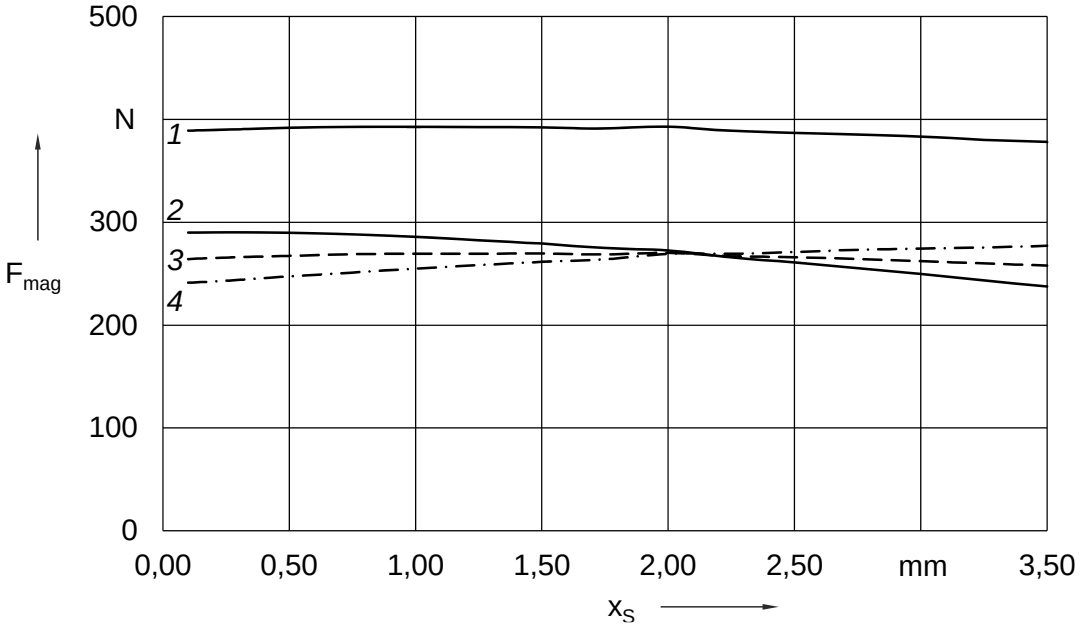
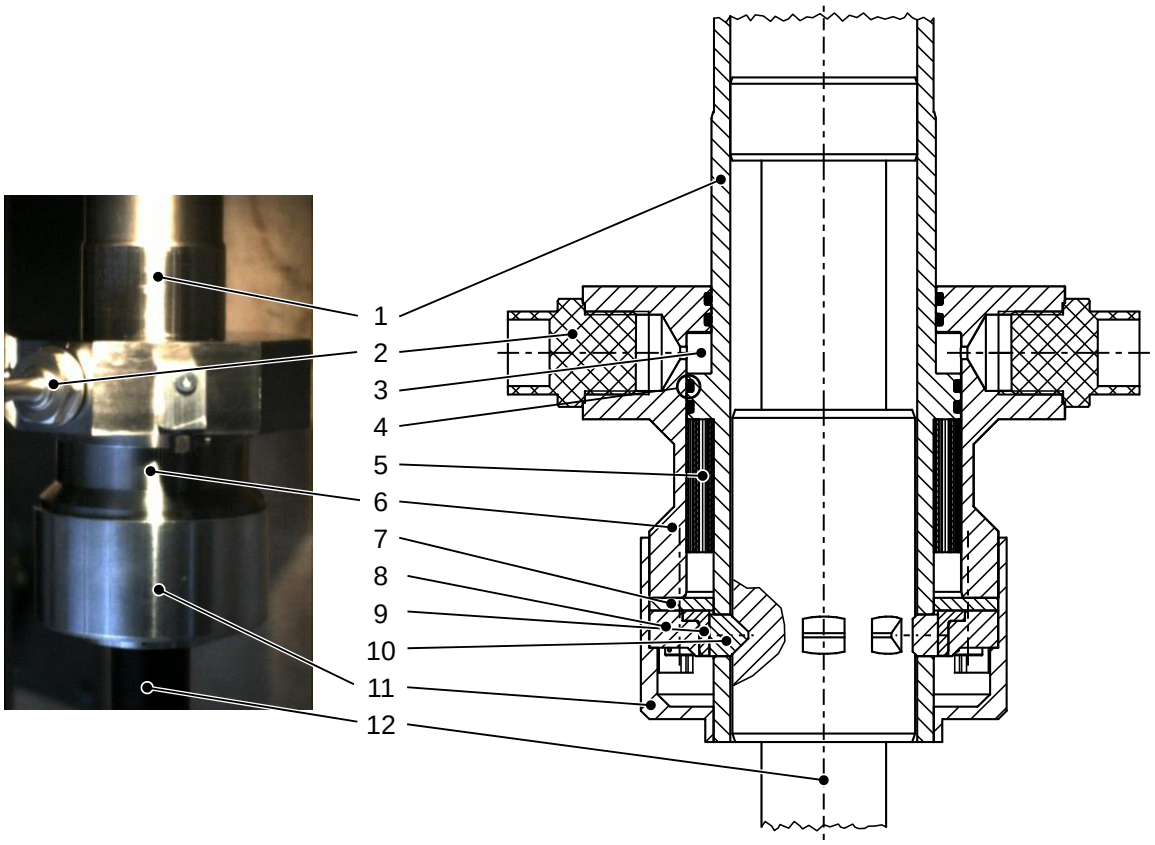


Bild 5.7: Magnetkraft-Stellweg-Kennlinie des redundanten Elektromagneten;
1: $I_1 = I_2 = I_{max}$; 2: $I_1 = 0$ A, $I_2 = I_{max}$; 3: $I_1 = I_2 = I_{max}/2$; 4: $I_1 = I_{max}$, $I_2 = 0$ A

5.4 Irreversible fremdbetätigte Linearkupplung

5.4.1 Aufbau und Funktionsweise

Die Entwurfsphase zur irreversiblen Linearkupplung beinhaltet das konkrete Gestalten von zwei Prototypen mit gleichen Prinzipien aber unterschiedlicher Zielsetzung, die im Folgenden beschrieben wird. Dabei stellt der erste Prototyp, siehe Bild 5.8, einen Funktionsdemonstrator dar, bei dem auf Flexibilität während der experimentellen Untersuchungen Wert gelegt wird, sodass wesentliche Funktionen validiert werden können.



1	Ausgangskolben	5	Wabenstruktur	9	Gleitlager
2	Gasgeneratoren	6	Zughülse	10	Sperrstifte
3	Druckkammer	7	Scheibe	11	Gehäuse
4	dynamische Dichtungen	8	Sperrhülse	12	Kugelgewindetrieb (Dummy)

Bild 5.8: Erste irreversible fremdbetätigte Linearkupplung im gekoppelten Zustand: Prototyp (links), Schnittdarstellung (rechts)[14]

Der Fokus liegt auf den folgenden wesentlichen Funktionen:

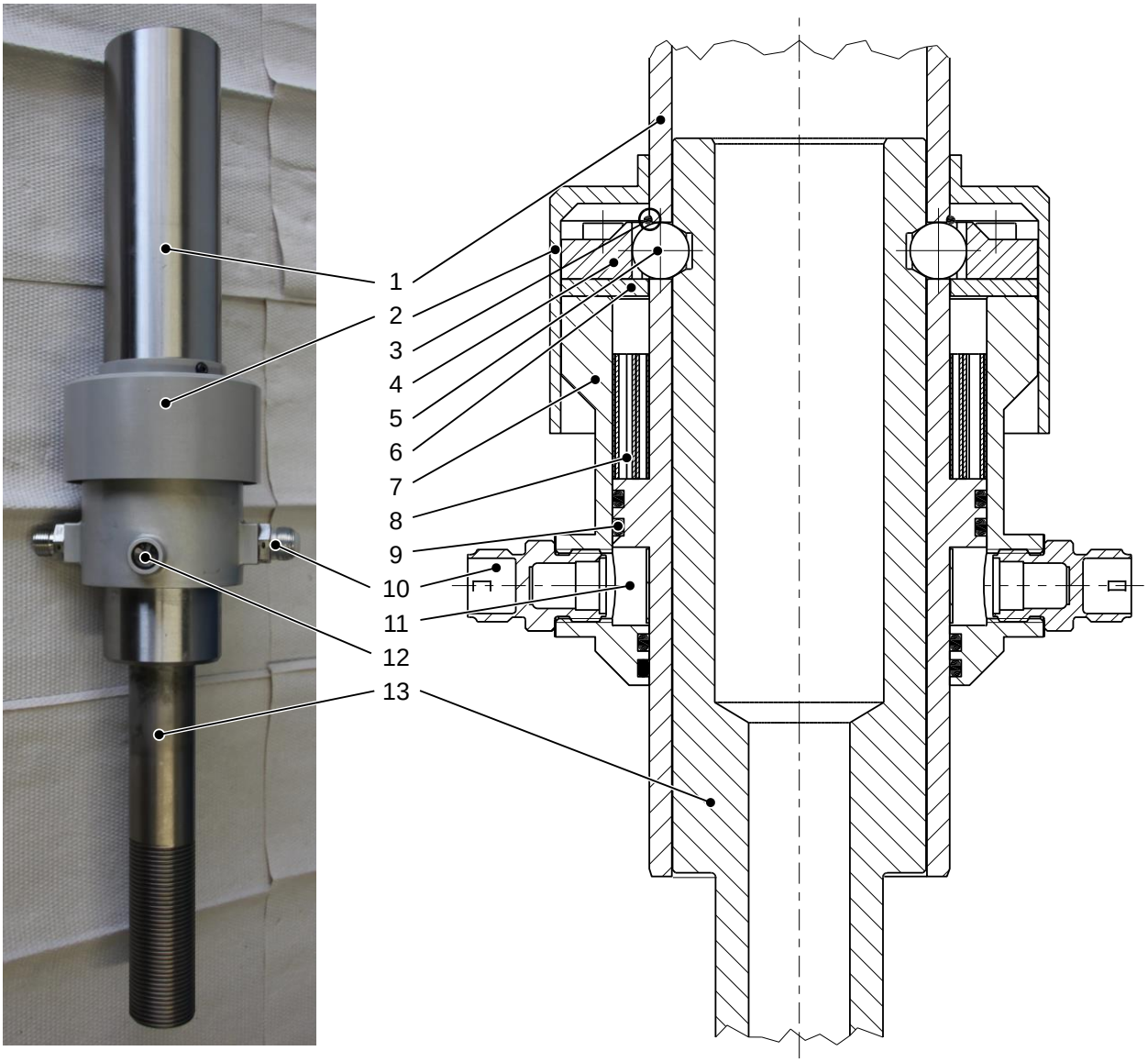
- Gespeicherte chemische Energie schnell freigeben und in mechanische Energie wandeln
- Antriebsstrang des elektromechanischen Aktors mittels leicht bauender Komponenten bei hohen Vorspannkräften entkoppeln
- Restliche kinetische Energie der Schalthülsenbaugruppe mit minimalem Einfluss auf die anderen Antriebsstrangkomponenten absorbieren

Insbesondere lassen sich mit dem ersten Prototypen unterschiedliche Konfigurationen und Bauteile unterschiedlicher Hersteller testen. Des Weiteren ist die Sperrhülse derart

[14] Die Scherstifte sind in Bild 5.8 nicht zu sehen. Ferner ist die erste fremdbetätigte Linearkupplung noch ohne elastischen Ring ausgestattet.

gestaltet, dass sich an ihr diverse Sensoren zur Charakterisierung der Entkoppelungsvorgänge anbringen lassen.

Mit den Erkenntnissen zu den Komponenten der ersten irreversiblen Linearkupplung (siehe [NAUBERT13A]) lassen sich Rückschlüsse für die Entwurfsphase des zweiten irreversiblen Prototyps ziehen (siehe Bild 5.9), der seriennah gestaltet ist. Neben den oben genannten Funktionen können mit ihm die restlichen Anforderungen (siehe Kapitel 3.2.10), wie die geforderte maximale Masse der Linearkupplung, eingehalten werden.



1 Ausgangskolben
2 Gehäuse
3 elastischer Ring
4 Sperrhülse
5 Sperrkugeln
6 Scheibe
7 Zughülse
8 Wabenstruktur
9 dynamische Dichtungen
10 Gasgeneratoren
11 Druckkammer
12 Scherstifte
13 Kugelgewindetrieb (links als Dummy)

Bild 5.9: Zweite irreversible fremdbetätigte Linearkupplung im gekoppelten Zustand: Prototyp (links), Schnittdarstellung (rechts)

Zwischen den beiden Prototypen liegen folgende wesentliche Optimierungsschritte:

- Installation von kompakteren Gasgeneratoren GG821 [LELL13]
- Modularisierung: gleiche Schnittstellen zum Kugelgewindetrieb für die reversible und irreversible Linearkupplung
- Sperrkugeln anstelle von Sperrstiften[15]
- Elastischer Ring für das Zurückhalten der Sperrkugeln nach dem Entkuppeln
- Überarbeitung der Sperrhülse hinsichtlich der Sperrkugeln
- Reduktion der Bauteilkomplexität des Gehäuses
- Überarbeitete Zughülse hinsichtlich der Gasgeneratoren, der Scherstifte und der Schnittstellen für Sensoren
- Kompaktere Wabenstruktur mit erhöhter Stauchkraft
- Änderung der Werkstoffe insbesondere für die Zughülse

Die folgende verallgemeinerte Funktionsweise ist für beide Prototypen gültig[16]:

Im gekoppelten Zustand übertragen Sperrelemente den axialen Kraftfluss des Antriebsstrangs. Für deren radiale Abstützung ist über ihnen eine Sperrhülse platziert. Zusammengeschraubt bilden die Komponenten Sperrhülse, Scheibe und Zughülse eine Hülsenbaugruppe, deren Position im gekoppelten Zustand mit Hilfe von Scherstiften fixiert wird. Mit dem Bestromen der redundanten Gasgeneratoren wird der Entkoppelungsvorgang eingeleitet, sodass durch die erzeugten Verbrennungsgase der Gasdruck in der Druckkammer über den Auslösedruck ansteigt und die Hülsenbaugruppe beschleunigt wird. Durch das Verschieben der Hülsenbaugruppe werden die Sperrelemente in radialer Richtung freigegeben, wodurch das Verschieben der Sperrelemente durch äußere auf den Antriebsstrang wirkende Axialkräfte ermöglicht wird. Ein elastischer Ring verhindert ein ungewolltes Zurückfallen der Sperrelemente. Die restliche kinetische Energie der Hülsenbaugruppe wird durch eine vorgestauchte Wabenstruktur absorbiert.

[15] Kugeln sind in der Herstellung kostengünstiger als Sperrstifte. Zudem lassen sich mit ihnen reibungs- und verschleißarme Konstruktionen einfacher umsetzen.

[16] Dies bedeutet, dass Begriffe wie Sperrkugeln und Sperrstifte verallgemeinert mit dem Begriff Sperrelemente beschrieben werden.

Im Rahmen von automatisierten Vorflugversuchen[17] ist der elektrische Zündkreislauf mittels eines im Datenblatt des Gasgenerators dokumentierten Messstroms zu testen. Hierfür wird die folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

1. Wähle den zu testenden elektrischen Zündkreislauf aus
2. Bestrome den ausgewählten Zündkreislauf für 10 ms
3. Überprüfe die Verfügbarkeit des Zündkreislaufs mit Hilfe eines Stromsensors
4. Fahre mit dem nächsten elektrischen Zündkreislauf fort und springe zu 1) zurück

Die Masse der zweiten irreversiblen Linearkupplung beträgt 688 g. Dieser Wert beinhaltet die in Bild 5.9 dargestellte Baugruppe abzüglich der Massen des Ausgangskolbens und des Kugelgewindetriebs, da die beiden zuletzt genannten Bauteile nach Anforderung 3.6 bei der Massenberechnung nicht zu berücksichtigen sind. Die Masse der irreversiblen Linearkupplung liegt unterhalb der Anforderung 3.7 in Kapitel 3.2.10.

Nach Festlegung aller Toleranzen, Werkstoffe sowie der Wärmebehandlungen betragen die Herstellkosten pro Baugruppe ca. 1570 €. Dies umfasst alle Kosten zur Herstellung der Bauteile[18], der Zukaufteile, des Zusammenbaus und der Prüfung des Prototyps. Eine Prognose für eine mögliche Serie zwischen 101 und 1000 Stück resultiert in gesenkten Herstellkosten von ca. 1360 € pro Kupplung (siehe [NAUBERT15B] auf Basis von [TORO15B]). Beide Kostenwerte erfüllen die Anforderung 9.1 hinsichtlich der geforderten Herstellkosten.

Ferner ergibt die Untersuchung zur Zuverlässigkeit der irreversiblen Linearkupplung (siehe [NAUBERT13A]), dass vor dem Entkuppeln mit einer Nichtverfügbarkeit – d. h. ein ungewolltes Auslösen der Kupplung tritt auf – von ca. $2 \cdot 10^{-7}$ Ausfällen zu rechnen ist. Diese Nichtverfügbarkeit bezieht sich auf einen Zeitraum von 8 Jahren, währenddessen die Baugruppe keine Wartung erfordert. Ein fehlerhaftes Entkuppeln im Fall eines klemmenden Antriebsstrangs ist mit der Nichtverfügbarkeit von ca. $1 \cdot 10^{-8}$ Ausfällen prognostiziert, das beispielsweise durch die simultanen Fehlfunktionen beider Gasgeneratoren hervorgerufen wird. Nach dem Entkuppeln ist der Antriebsstrang solange freigängig zu halten, bis der Pilot sicher gelandet ist. Alle Kupplungsfehler, die diesen

[17] Wie bei diversen anderen pyrotechnischen Technologien üblich, ist auch für diese Anwendung eine kontinuierliche Überprüfung der elektrischen Zündkreisläufe oder eine Überprüfung alle 10 ms möglich. Diese Vorgehensweise führt zu automatisierten Versuchen während des Flugs.

[18] Ausgenommen sind die Bauteilkosten des Kugelgewindetriebs (Dummy), da diese bei einem potentiellen Serienprodukt nicht zu den Herstellkosten der Kupplung gehören.

Freilauf unterbinden, führen zu einer Nichtverfügbarkeit von höchstens $4 \cdot 10^{-8}$ Ausfällen. Zusammenfassend erfüllt die irreversible Linearkupplung die Anforderung 5.2.

5.4.2 Auslegung des Pyromechanismus

Kern der Dimensionierung der irreversiblen Linearkupplung ist die Berechnung der schnell schaltenden Entkoppelungsvorgänge, die die Dynamik der beschleunigten Hülsenbaugruppe mit der Modellierung aller relevanten Kräfte umfasst. Während die Reibungskräfte an den O-Ringen und den Sperrkugeln, die Scherkraft der Scherstifte sowie die Kraftkennlinie der Wabenstruktur durch standardisierte und größtenteils herstellerspezifische Modelle beschrieben werden, ist für die Charakterisierung der Antriebskraft ein thermodynamisches Modell zur Berechnung des Gasdrucks aufzustellen. Das Gesamtmodell zu den Entkoppelungsvorgängen ergibt ein Differentialgleichungssystem erster Ordnung, welches mittels numerischer Integration gelöst wird. Wesentliche Erkenntnisse zur erforderlichen Menge der Treibladung, zum Auslösedruck und zum Druckverlauf während der Entkoppelungsvorgänge sowie der simulative Nachweis der Anforderung 2.2 zur maximalen Schaltzeit resultieren direkt aus den Berechnungen. Ferner lassen sich Eingangsgrößen (Kräfte und Druckwerte) für weiterführende Auslegungsberechnungen der mechanischen Komponenten, wie z. B. die Dimensionierung der Schraubenverbindungen und der Wandstärke der Druckkammer, ermitteln.

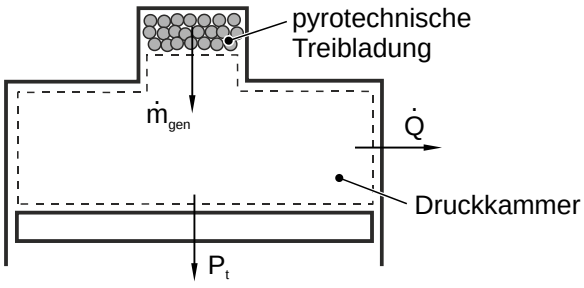


Bild 5.10: Skizze zum thermodynamischen Modell

In Analogie zu den thermodynamischen Modellen nach [JANG14, LEE09 und RIEGER06, S. 8ff] umfasst das betrachtete System das Gasvolumen im Inneren der Druckkammer (siehe Bild 5.10), zu dem die Gleichung der Energieerhaltung (5.24), die Gleichung der Massenerhaltung (5.25) und das ideale Gasgesetz (5.26) wie folgt aufgestellt werden (siehe [JANG14]):

$$\frac{d\left(\rho \cdot V \cdot c_v \cdot T\right)}{dt} = \dot{m}_{gen} \cdot c_p \cdot T - \left(p \cdot A_p - F_{R,Kugel} - F_{R,O-Ringe} - F_{WS}\right) \cdot v_H - \dot{Q} \qquad (5.24)$$

$$\frac{d(\rho \cdot V)}{dt} = \dot{m}_{gen} \tag{5.25}$$

$$p = \rho \cdot R_s \cdot T \tag{5.26}$$

Hinsichtlich der Energieerhaltung rufen der zugeführte Gasmassenstrom, die mechanische Leistung und der Wärmestrom über die Systemgrenze Änderungen der inneren Energie des Gases hervor. In Abhängigkeit von den Zustandsgrößen[19] des Differentialgleichungssystems tragen die Antriebskraft des Gases, die Reibungskräfte an den Sperrkugeln und den dynamischen Dichtungen sowie die Stauchkraft der Wabenstruktur zur mechanischen Leistung bei.

Eine gängige Art, den Gasmassenstrom zu modellieren, stellt das empirische Abbrandgesetz von Vieille, siehe [RIEGER06, S. 13], dar, bei dem zunächst die Abbrandrate r_b (Gleichung (5.27)) als Funktion vom Gasdruck p und den treibladungsabhängigen Konstanten a und n bestimmt wird. Physikalisch entspricht sie der negativen Änderungsrate der Radien aller j kugelförmigen Treibladungspartikeln. Das Produkt aus der Abbrandrate r_b, der gesamten Oberfläche aller Treibladungspartikel A_T, der Treibladungsdichte ρ_T und dem Gasanteil unter den Reaktionsprodukten η_g ergibt den generierten Gasmassestrom (Gleichung (5.29)).

$$r_b = -\frac{dr}{dt} = a \cdot p^n \tag{5.27}$$

$$A_T = j \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 \tag{5.28}$$

$$\dot{m}_{gen} = \eta_g \cdot \rho_T \cdot A_T \cdot r_b \tag{5.29}$$

Zum Aufstellen des Differentialgleichungssystems ist ferner die geometrische Bedingung zur zeitlichen Änderung des Gasvolumens in der Druckkammer nach Gleichung (5.30) aufzustellen. Während der erste Summand für die Volumenvergrößerung aufgrund des Treibladungsabbrands steht, berücksichtigt der zweite Summand selbige bei fortschreitender Hülsenbaugruppenbewegung.

$$\frac{dV}{dt} = A_T \cdot r_b + A_p \cdot v_H \tag{5.30}$$

[19] Die Zustandsgrößen des Differentialgleichungssystems setzen sich aus dem Radius der Treibladungspartikel r, dem Gasdruck in der Druckkammer p, der Position x_H und der Geschwindigkeit v_H der Hülsenbaugruppe zusammen.

Des Weiteren benötigt die Gleichung zur Energieerhaltung (5.24) ein Modell des Wärmestroms, der sich im Allgemeinen aus den Beiträgen zur Wärmeleitung, zur Konvektion und zur Strahlung zusammensetzt. Aufgrund der Schnelligkeit des Schaltvorgangs bleibt im Rahmen dieser Arbeit die Wärmeleitung der Druckkammer unberücksichtigt, sodass sich der Wärmestrom vom Gas an die Druckkammerwand wie folgt ergibt:

$$\dot{Q} = \alpha_K \cdot A_{DK} \cdot \left(T - T_W\right) + \sigma \cdot A_{DK} \cdot \left(\varepsilon_G \cdot T^4 - \alpha_{DK} \cdot T_W^4\right) \tag{5.31}$$

Während mit fortschreitender Hülsenbaugruppenbewegung die Druckkammeroberfläche A_{DK} steigt und die Gastemperatur T_G direkt vom Gasdruck und von der Gasmasse abhängt, fließen der Wärmeübergangskoeffizient α_K, der Gasemissionsgrad ε_G, der Absorptionsgrad der Druckkammer α_{DK}, die Wandtemperatur der Druckkammer T_W und die Stefan-Boltzmannkonstante σ als konstant angenommene Zahlenwerte in die Berechnung ein.

Dimensionierend für die Treibladungsmenge ist vor allem die über alle Sperrkugeln aufsummierte Reibungskraft $F_{R,Kugeln}$, da sie zum Entkuppeln von der Antriebskraft des Gases überschritten werden muss. Als Couloumbsche Reibungskraft modelliert, wirkt das mengenwertige Kraftgesetz, solange die Sperrkugeln im Kontakt mit der Sperrhülse stehen. Mit der in Kapitel 5.1.1 berechneten Normalkraft $F_{N,C}$ an einer Sperrkugel und dem Reibungskoeffizienten μ (siehe [VOGT01, S. 79]) lässt sich die über alle Sperrkugeln aufsummierte Reibungskraft $F_{R,Kugeln}$ wie folgt berechnen:

$$F_{R,Kugeln} \leq \mu \cdot \sum F_{N,C} \tag{5.32}$$

Die gewählte Modellierung der Reibungskräfte an den O-Ringen entspricht den Herstellerangaben nach dem Parker O-Ringe Handbuch von 2001 [PARKER01, S. 5-8f]. Bei festgelegten Abmessungen und Materialien hängt die Summe dieser Reibungskräfte direkt vom anliegenden Gasdruck ab und lässt sich für die irreversible Linearkupplung nach Gleichung (5.33) berechnen. Dabei ist zu beachten, dass bei funktionstüchtigen Dichtungen der hohe Gasdruck nur an den beiden innenliegenden O-Ringen anliegt und die außenliegenden O-Ringe zur Erhöhung der Betriebssicherheit installiert sind.

$$F_{R,O-Ringe} = 91{,}72 \cdot N + 0{,}1643 \cdot \frac{N}{bar} \cdot p \tag{5.33}$$

Nachdem die Sperrhülse von den Sperrkugeln getrennt ist, wird die Hülsenbaugruppe mittels der vorgestauchten Wabenstruktur abgebremst. Diese Art der Energieabsorption

unterbindet hohe Stoßbelastungen auf die anderen Antriebsstrangkomponenten. Hierzu zeigt die Kurve 2 in Bild 5.11 das qualitative Stauchkraft-Längenänderungs-Diagramm der Wabenstruktur. Solange die Hülsenbaugruppe in Bewegung ist und die Längenänderung noch nicht ihren Grenzwert $\Delta x_{WS,limit}$ (ca. 70 % der anfänglichen Wabenstrukturlänge) erreicht hat, lässt sich die Stauchkraft näherungsweise als konstante Kraft $F_{WS,konst}$ modellieren. Eine Wabenstruktur ohne Vorstauchung weist hingegen eine anfängliche Kraftspitze $F_{WS,peak}$ auf (siehe Kurve 1 in Bild 5.11), die sich mittels der Vorstauchung eliminieren lässt. Der Flächeninhalt unter der Stauchkraftkurve bis hin zur tatsächlichen Längenänderung Δx_{WS} entspricht der absorbierten Energie.

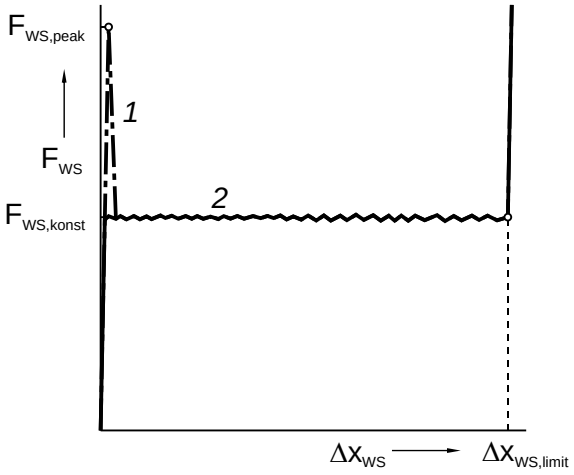


Bild 5.11: Qualitative Darstellung der Stauchkraft-Längenänderungs-Kurve von Wabenstrukturen; 1: ohne Vorstauchung, 2: mit Vorstauchung

Gekoppelt ist das thermodynamische Modell mit der Bewegungsgleichung der Hülsenbaugruppe (Gleichung (5.35)), sobald die Antriebskraft die Haftreibungskräfte und die Scherkraft der Scherstifte überwindet. Letztgenannte Scherkraft wird mit dem Produkt der Werkstoff-Schubfließgrenze und der Querschnittsfläche der Scherstifte berechnet (Gleichung (5.34)).

$$F_{Stifte} = \tau_{F,s} \cdot A_{Stifte} \tag{5.34}$$

$$\ddot{x}_H = \frac{dv_H}{dt} = \frac{p \cdot A_p - F_{R,Kugeln} - F_{R,O-Ringe} - F_{WS}}{m_H} \tag{5.35}$$

Die Gleichungen (5.24) – (5.35) beschreiben alle relevanten physikalischen Zusammenhänge der pyrotechnisch betätigten Entkoppelungsvorgänge, wobei das Auflösen dieser Gleichungen nach den Änderungsraten der Zustandsgrößen des Differentialgleichungssystems in [JANG14] näher beschrieben ist.

Bild 5.12 zeigt exemplarisch das Simulationsergebnis der favorisierten Konfiguration bei maximaler Vorspannkraft von 50 kN.

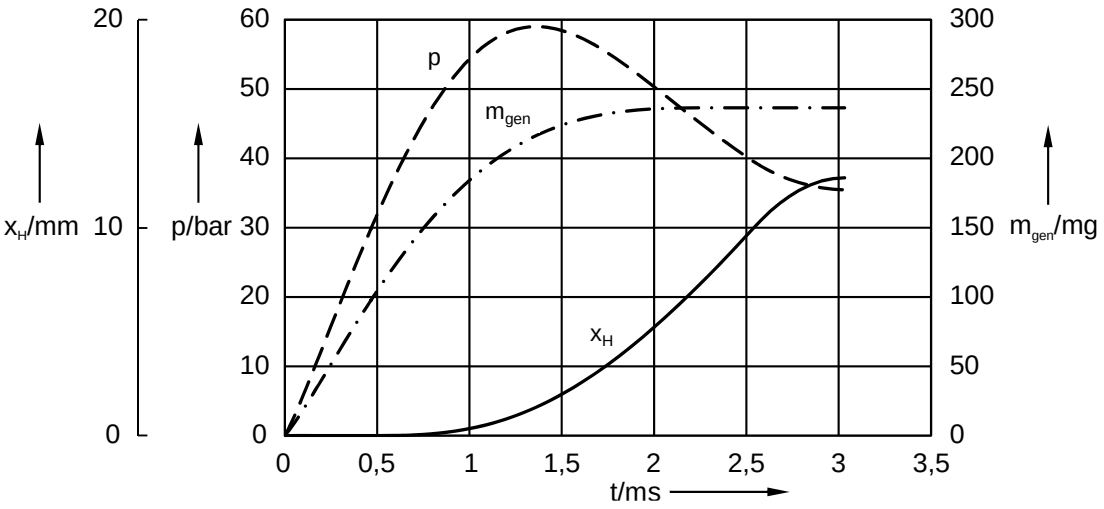


Bild 5.12: Simulierter Entkopplungsvorgang der pyrotechnisch betätigten Linearkupplung bei maximaler Vorspannkraft

Zu Beginn der Simulation startet der Abbrand von 550 mg Treibladung, woraufhin der Gasdruck in der Druckkammer ansteigt. Bei ca. t = 0,5 ms erreicht dieser den Auslösedruck und die Antriebskraft des Gases überwindet alle modellierten Reibungskräfte sowie die Scherkraft der Scherstifte. Infolgedessen beschleunigt die Hülsenbaugruppe. Bei ca. t = 2,55 ms löst sie sich von den Sperrkugeln und öffnet damit den axialen Kraftfluss des Antriebsstrangs. Mit zunehmendem Druckkammervolumen und fortschreitendem Wärmetransport sinkt das Druckniveau in der Kammer, obwohl der Gasmassenstrom erst bei ca. t = 2,3 ms versiegt. Die Wabenstruktur mit der ausgelegten Stauchkraft von $F_{WS,konst}$ = 15 kN absorbiert sicher die verbleibende kinetische Energie der Hülsenbaugruppe. Die konstanten Größen dieser Konfiguration inklusive ihrer Referenzen sind der Tabelle 5.3 zu entnehmen.

Physikalische Größe	Konstanter Zahlenwert				Referenz
Isentropenkoeffizient	κ	=	1,1038		[JANG14]
Spezifische Gaskonstante der Produkte	R_s	=	144,02	J/(kg·K)	[JANG14]
Gasflammentemperatur	T_f	=	4810	K	[JANG14]
Abbrandratensteigung	a	=	0,01882	m/(s·Pa^n)	[JANG14]
Abbrandratenexponent	n	=	0,182		[JANG14]
Dichte der Treibladungspartikel	ρ_T	=	2440	kg/m^3	[JANG14]
Korrekturkoeffizient für reale Gase	η_p	=	0,68		[JANG14]
Gasgewichtanteil	η_g	=	0,43		[JANG14]
Anfängliche Treibladungsmasse	$m_{T,0}$	=	550	mg	kundenspezifische Füllung
Anfänglicher Treibladungspartikelradius	r_0	=	0,7	mm	Herstellerang.
Wandtemperatur der Druckkammer	T_W	=	293	K	Laborbeding.
Absorptionsgrad polierter Edelstahl	$\alpha_{DK,Fe}$	=	0,2		[Marek07, S. 248]
Absorptionsgrad sandgestrahltes Aluminium	$\alpha_{DK,Alu}$	=	0,40		[Sturm90, S. 176]
Emissionsgrad Verbrennungsgase	ε_g	=	0,35		abgeschätzt anh. [ISUT16, S. 817 ff]
Wärmeübergangskoeffizient, kräftig bewegt	α_K	=	290	W/(m^2·K)	abgeschätzt anhand [SCHWEIZER16]
Hülsenbaugruppenmasse	m_H	=	543	g	Konstruktion
Hülsenaussendurchmesser	D_{aH}	=	66	mm	Konstruktion
Hülseninnendurchmesser	D_{iH}	=	53	mm	Konstruktion
Anfängliche Druckkammerlänge	L_{0H}	=	13,8	mm	Konstruktion
Schnurdicke der O-Ringe	d_O	=	2,5	mm	Konstruktion
Reibungskoeffizient	μ	=	0,1155		Herstellerang.
Vorspannkraft auf die Linearkupplung	F_{ax}	=	50	kN	Anforderungsliste
Scherkraft der Scherstifte	F_{Stifte}	=	120	N	Konstruktion
Stauchkraft der Wabenstruktur	$F_{WS,konst}$	=	15	kN	Konstruktion

Tabelle 5.3: Konstante Simulationsgrößen für die Berechnung der irreversiblen Linearkupplung

Weitere Auslegungsberechnungen zur Wabenstruktur und zur Druckkammerwand sind im Anhang 0 und A.4 hinterlegt.

6 Ausarbeitungsphase

In der anschließenden Ausarbeitungsphase werden alle notwendigen Unterlagen für die Herstellung, die Montage und den Betrieb der Linearkupplungen erstellt. Im Bereich des technischen Zeichnens betrifft dies das Anfertigen der Einzelteilzeichnungen, der Baugruppenzeichnungen und der Stücklisten [TORO15C]. Ferner sind Prüfvorschriften zur Qualitätssicherung und Montageanleitungen zur Produktdokumentation erforderlich. Auf eine vollständige Produktdokumentation, wie sie in [BINZ14] beschrieben ist, wird im Rahmen des FASTDISC-Projekts verzichtet, da nach dem Forschungsprojekt noch keine umgehende Serienherstellung geplant ist. Die Ausarbeitungsphase des FASTDISC-Projekts wurde von der Firma PyroGlobe GmbH bezüglich des Gasgenerators und von der Firma Umbra Cusicinetti S.p.A. hinsichtlich der restlichen Komponenten übernommen.

7 Erprobung

Nach der Ausarbeitungsphase folgt die Erprobung der Linearkupplungen. Dies umfasst die Realisierung der Prototypen, die Spezifikation der Funktionsnachweise, die Entwicklung von Prüfständen, die Vorgehensweise und Methoden zu den experimentellen Untersuchungen, die Messergebnisse zu den Funktionsnachweisen und die Diskussionen der Ergebnisse (siehe [NAUBERT13], [NAUBERT14A], , [NAUBERT14B], [HÖNER15], [NAUBERT16B], BACHMANN16A], [TORO16]). Im Rahmen des FASTDISC-Projekts werden die Experimente in drei wesentliche Gruppen unterteilt: die statischen Tests, die Lebensdauertests und die Umweltverträglichkeitstests. Ein Teil der statischen Tests sind die Experimente zu den Entkoppelungsversuchen. Sie stehen im Fokus der vorliegenden Arbeit, da sie die Hauptfunktion der Kupplungen nachweisen und maßgeblich vom IKTD durchgeführt wurden. Zu diesem Zweck wurde ein Prüfstand entwickelt, der im folgenden Unterkapitel näher beschrieben wird. Darauf aufbauend behandeln die nächsten Unterkapitel die experimentellen Untersuchungen zu den Entkoppelungsvorgängen mit den spezifischen Ausführungsvarianten.

7.1 Prüfstand zum Entkuppeln von hohen Lasten

Der in Bild 7.1 dargestellte Prüfstand dient dem Nachweis und der Charakterisierung von Entkoppelungsvorgängen hoch belasteter Linearkupplungen.

Mit Hilfe des Spindelhubgetriebes lässt sich die Vorspannkraft von bis zu +/-100 kN manuell aufbringen und je nach Kraftrichtung eines der beiden Tellerfederpakete stauchen. Die Auslenkung der Tellerfedern ermöglicht erstens die exakte Einstellung der Vorspannkräfte und zweitens die Ermittlung des Freischaltzeitpunktes durch das Schwingen der entriegelten Bauteile nach dem Entkuppeln. Der Kraftfluss wird weiter über den zu testenden Prototyp und den Kraftsensor geleitet. Beide lassen sich mittels zweier Kugelgelenke einfach ein- und ausbauen. Zudem werden Prototyp und Kraftsensor frei von Querkräften gehalten, die beispielsweise durch Ausrichtungsfehler verursacht werden können. Über zwei Traversen, zwei Stangen und vier hydraulische Spannbuchsen wird der Kraftfluss geschlossen.

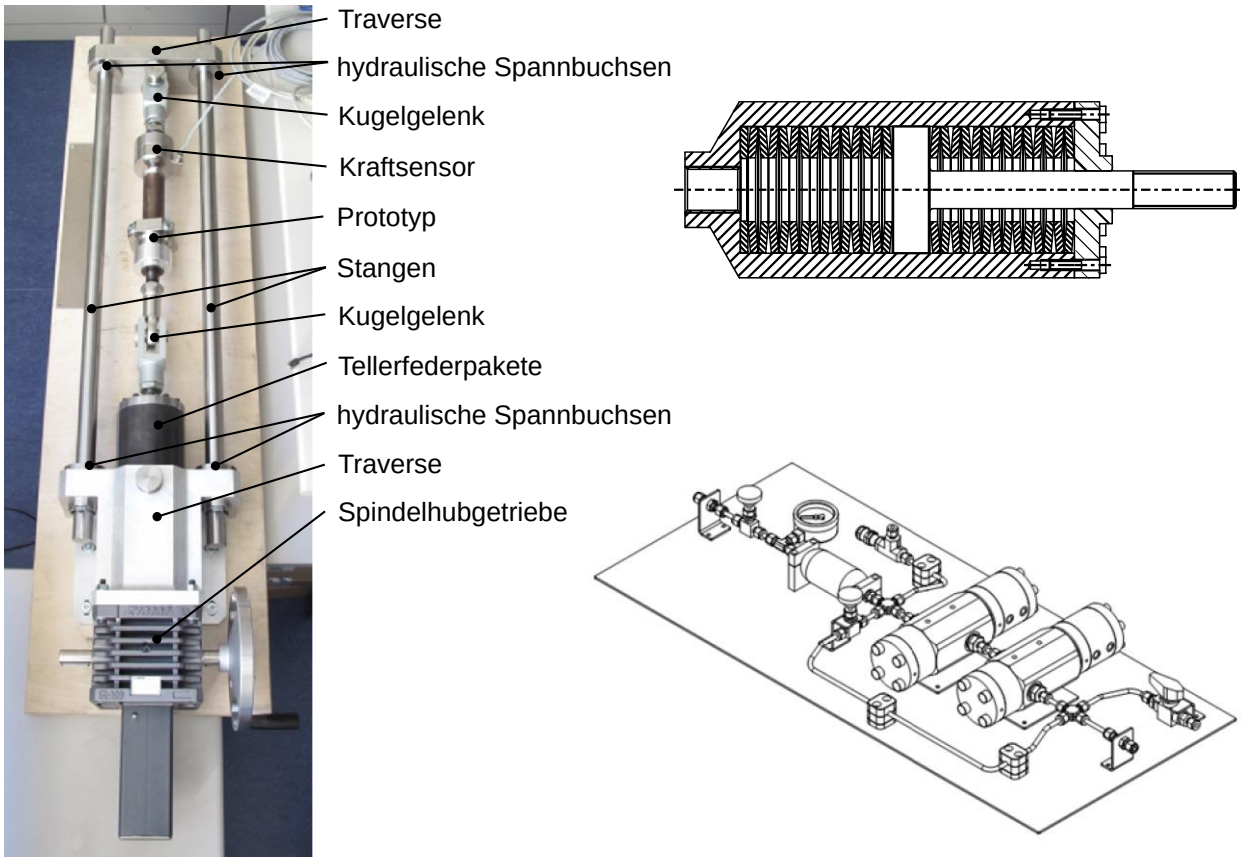


Bild 7.1: Prototyp und Prüfstand zum Entkuppeln hoher Lasten (links) mit pneumatischer Steuerungsanlage (unten rechts), Schnittansicht der Tellerfederpakete (oben rechts)

Bei ersten Vorversuchen mit der irreversiblen Linearkupplung ersetzt Druckluft die bei der chemischen Reaktion generierten Gase, damit der Auslösedruck der Kupplung ermittelt werden kann. Dabei dient ein Druckluftbehälter als Luftversorgung. Die Luftzufuhr wird mittels der im Bild 7.1 (unten rechts) dargestellten pneumatischen Anlage gesteuert.

Das Messdatenerfassungssystem vervollständigt den Aufbau des Prüfstandes, an das je nach Prototyp und Messaufgabe Sensoren angeschlossen werden. Bei den in Kapitel 7.3 beschriebenen Experimenten mit den irreversiblen Linearkupplungen stehen Wegsensoren, Kraftsensoren und Drucksensoren zur Verfügung, die die Position der Hülsenbaugruppe, die Position des Kugelgewindetriebs, die Axialkraft auf den eingebauten Prototypen und den Druck in der Druckkammer messen. Bei den in Kapitel 7.2 beschriebenen Experimenten mit der reversiblen Linearkupplung kommt anstelle des Drucksensors ein Stromsensor zum Einsatz, der in die Leistungselektronik der Baugruppe integriert ist (siehe Bild 7.2).

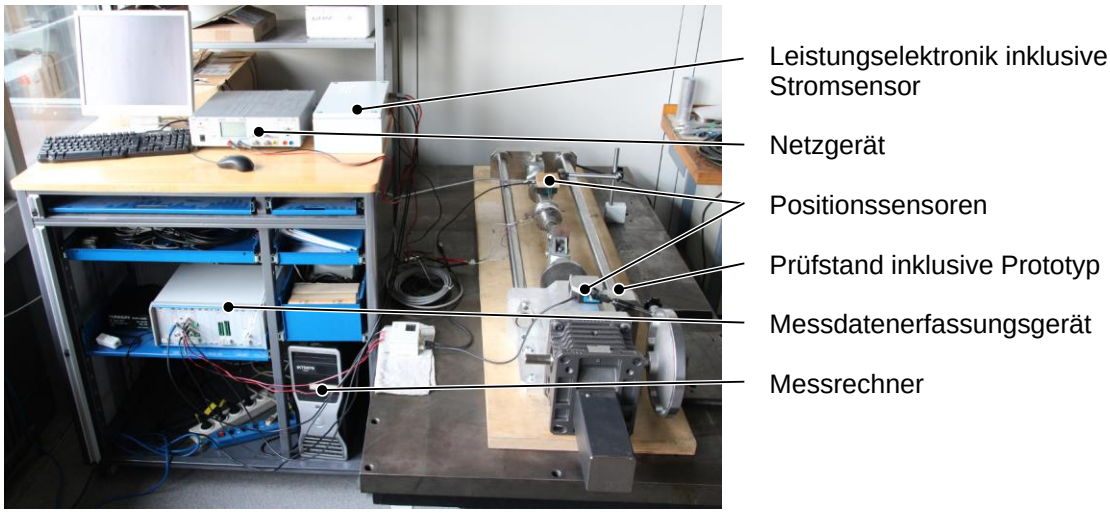


Bild 7.2: Messaufbau für die reversible fremdbetätigte Linearkupplung

7.2 Experimentelle Untersuchungen zur reversiblen Linearkupplung

7.2.1 Vorgehensweise und Methoden

Für die ersten Experimente wurden weniger Schraubenfedern in die Linearkupplung eingebaut als ursprünglich vorgesehen. Konkret bedeutet dies, dass 20 von 30 der äußeren Schraubenfedern und 9 von 14 der inneren Schraubenfedern installiert sind. Wird der Prototyp mit der ursprünglich vorgesehenen Anzahl an Schraubenfedern ausgestattet, reicht die Kraft des Elektromagneten nicht aus, um die Ankerhülse anzuziehen und damit die Linearkupplung zu entkoppeln. Mit der Reduktion der äußeren Schraubenfedern wird zwar die Gegenkraft des Elektromagneten reduziert und das Entkuppeln bei kleinen und mittleren Axialkräften ermöglicht, mit einem Entkuppeln bei sehr hohen Axialkräften ist aber aufgrund der reduzierten Gesamtfederkraft auf die Sperrhülse nicht mehr zu rechnen. Aus diesem Grund wird folgende Vorgehensweise gewählt: Die ersten Experimente starten bei kleinen Axialkräften, die sukzessive gesteigert werden, bis die Linearkupplung im Zweispulenbetrieb nicht mehr entkuppelt oder die Lastgrenze erreicht ist. Danach wird die Linearkupplung im Einspulenbetrieb untersucht, wobei ebenso zunächst kleine Axialkräfte und dann schrittweise erhöhte Axialkräfte vor dem Entkuppeln eingestellt werden. Sobald die Kraft des Elektromagneten im Einspulenbetrieb nicht mehr zum Schalten ausreicht, wird die Versuchsserie abgebrochen.

7.2.2 Messergebnisse

Die Tabelle 7.1 zeigt eine Zusammenfassung der Messergebnisse zu den Entkoppelungsexperimenten mit der reversiblen Linearkupplung. Zunächst wird die

Linearkupplung bei kleinen Axialkräften mit beiden Spulen betrieben, da bei dieser Kombination die größte Magnetkraft des Elektromagneten gegen die kleinsten Reibungskräfte an der Ankerhülse arbeitet. Hier schaltet die Linearkupplung am schnellsten und Schaltzeiten von ca. t_S = 6 ms stellen sich ein. Mit der schrittweisen Vergrößerung der Axialkräfte erhöhen sich auch die Reibungskräfte an der Ankerhülse, sodass eine größere Magnetkraft erforderlich ist, um alle Widerstandskräfte an der Ankerhülse zu überwinden und die Linearkupplung zu schalten. Dies spiegelt sich direkt in der Verlängerung der gemessenen Schaltzeiten wider, deren maximaler Messwert bei F_{ax} = -40 kN ca. t_S = 15 ms beträgt. Bei einer weiteren Erhöhung der Axialkraft zieht der Elektromagnet die Ankerhülse zwar immer noch an, aber die Kräfte der äußeren Schraubenfedern reichen nicht mehr aus, um die Sperrhülse zu verschieben. Die Linearkupplung bleibt somit gekoppelt.

Nr.	F_{ax} / kN	Bestromte Spule(n)	Entkuppeln	Schaltzeit t_s / ms
1	-5	Obere & untere Spule	Ja	6,0
2	+5	Obere & untere Spule	Ja	6,3
3	-20	Obere & untere Spule	Ja	10,5
4	+20	Obere & untere Spule	Ja	9,0
5	-30	Obere & untere Spule	Ja	10,6
6	+30	Obere & untere Spule	Ja	11,5
7	-40	Obere & untere Spule	Ja	15,0
8	+40	Obere & untere Spule	Ja	10,5
9	-50	Obere & untere Spule	Nein	-
10	-45	Obere & untere Spule	Nein	-
11	+50	Obere & untere Spule	Nein	-
12	-5	Obere Spule	Ja	15,8
13	+5	Obere Spule	Ja	15,5
14	-10	Obere Spule	Ja	17,4
15	+10	Obere Spule	Ja	16,8
16	-20	Obere Spule	Nein	-
17	+20	Obere Spule	Nein	-
18	-5	Untere Spule	Nein	-
19	+5	Untere Spule	Nein	-
20	-10	Untere Spule	Nein	-
21	+10	Untere Spule	Nein	-

Tabelle 7.1: Übersicht zu den Experimenten mit der reversiblen Linearkupplung

Die Untersuchungen im Einspulenbetrieb ergeben, dass die Spulen einzeln eine unterschiedlich starke Magnetkraft erzeugen. Während mit der unteren Spule keine Entkoppelungsvorgänge selbst bei kleinen Axialkräften möglich sind, erzeugt die obere Spule ein ausreichendes elektromagnetisches Feld, um das Entkuppeln bei bis zu F_{ax} = ±10 kN durchzuführen. Die gemessenen Schaltzeiten von t_S = 15,5 ms bis zu 17,4 ms sind zwar deutlich länger als beim Zweispulenbetrieb, sie liegen aber immer

noch unterhalb des gewünschten Wertes in Anforderung 5.2. Bei weiterer Erhöhung der Axialkräfte ist schließlich die Kraft des Elektromagneten nicht mehr ausreichend, um die Ankerhülse zu bewegen und die Linearkupplung zu entriegeln.

Das Bild 7.3 zeigt exemplarisch die Messwerte zum 7. Experiment, bei dem zu Beginn die geschlossene Kupplung mit der Axialkraft von F_{ax} = -40 kN belastet ist.

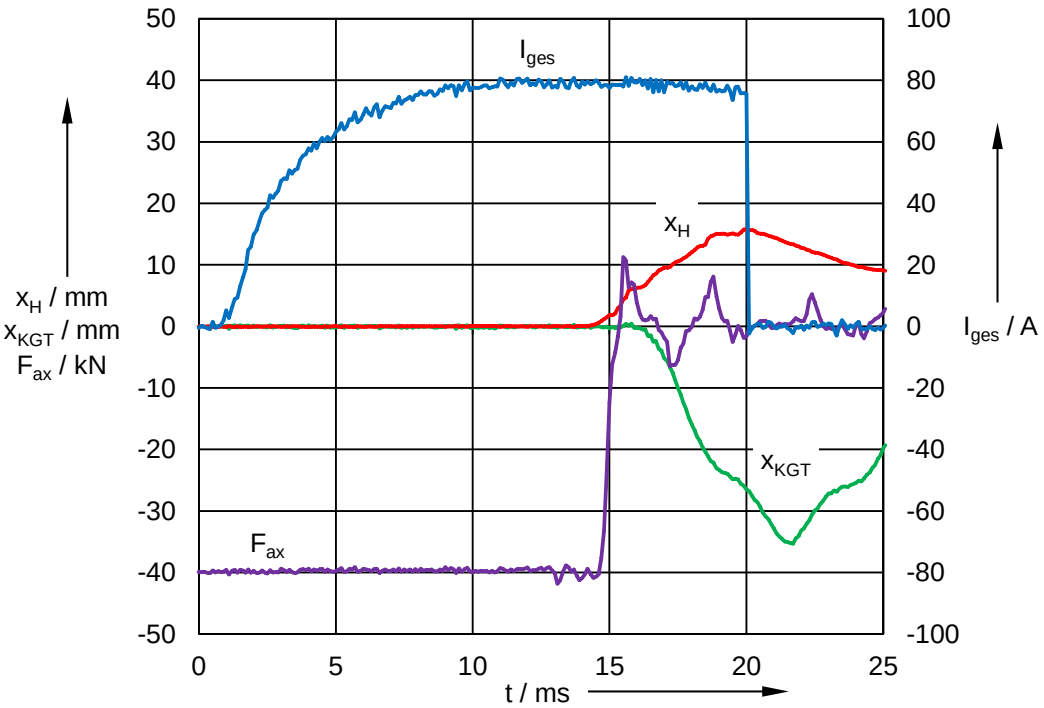


Bild 7.3: Dynamisches Verhalten der reversiblen Linearkupplung bei Vorspannkräften von F_{ax} = -40 kN und Bestromung beider Spulen

Nach der Betätigung beider Spulen bei t = 0 ms steigen die Ströme kontinuierlich an, deren Summe I_{ges} mit dem Signal des Stromsensors aufgezeichnet wird. Dieser Stromfluss führt zum Aufbau des magnetischen Felds[20] und folglich zu Reluktanzkräften an der Ankerhülse. Sobald diese Kräfte ausreichend groß sind, fährt die Ankerhülse ein, um das zweite Kugelpaket in radialer Richtung freizugeben. Ab ca. t = 14 ms, siehe Positionssignal der Sperrhülse x_H, beschleunigen die Kräfte der äußeren Schraubenfedern die Sperrhülse und entriegelt damit das erste Kugelpaket. Die zuvor eingestellte Axialkraft sorgt für das radiale Verschieben des ersten Kugelpakets und damit für das Entriegeln des Antriebsstrangs. Folgerichtig fällt das Kraftsignal F_{ax} bei ca. t = 15 ms

[20] Es ist zu beachten, dass die Wirbelströme in den umliegenden Bauteilen zu geringfügigen, zeitlichen Verzögerungen zwischen dem Aufbau der Spulenströme und dem Aufbau des magnetischen Feldes führen. Die direkte Messung des magnetischen Feldes ist hier nicht vorgesehen.

gegen null und das Positionssignal des Kugelgewindetriebs x_{KGT} beginnt zu schwingen. Bei t = 20 ms wird letztlich die Stromversorgung des Elektromagneten ausgeschaltet, das sich im Stromsignal I_{ges} widerspiegelt.

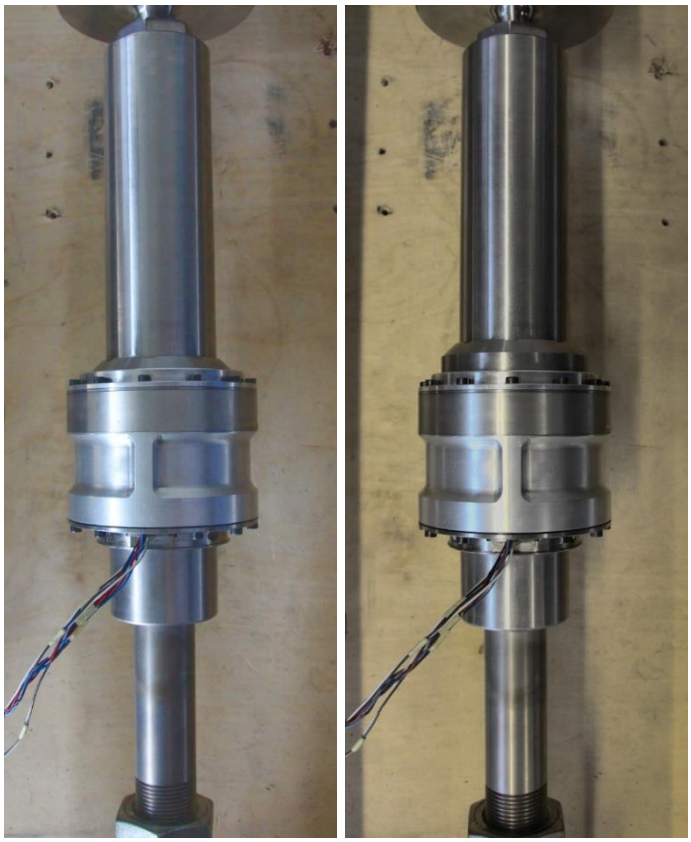


Bild 7.4: Reversible fremdbetätigte Linearkupplung vor dem Entkuppeln (links) und nach dem Entkuppeln (rechts)

Der Vollständigkeit halber sind die Diagramme zu den Experimenten 1. – 8. und 12. – 15. im Anhang A.1 festgehalten. Das dynamische Verhalten der Kupplung lässt sich während diesen Experimenten in Analogie zum obigen Beispiel beschreiben. Fotos zur Linearkupplung vor und nach dem Entkuppeln sind in Bild 7.4 dargestellt, wobei insbesondere die ein- bzw. ausgefahrene Sperrhülse zu sehen ist.

7.2.3 Diskussion der Ergebnisse

Mit der reversiblen Linearkupplung ist es im Zweispulenbetrieb aktuell möglich, Antriebsstränge, die mit Axialkräften von bis zu ±40 kN belastet sind, innerhalb von maximal 15 ms robust zu entkuppeln. Da im Einspulenbetrieb die Linearkupplung deutlich weniger leistet und nur mit der Bestromung der oberen Spule das Entkuppeln bei Axialkräften von bis zu ±10 kN gelingt, sind die Ergebnisse noch nicht vollständig zufriedenstellend. Die Messergebnisse basieren auf einer Konfiguration mit reduzierter Schraubenfederanzahl, die so gewählt wird, dass es Entkoppelungsvorgänge bei ma-

ximalen Axialkräften ermöglicht. Hintergrund für die reduzierte Leistungsfähigkeit der Kupplung ist die zu kleine Kraft des Elektromagneten, sodass weitere Optimierungsschritte notwendig sind, um alle Anforderungen vollständig zu erreichen.

Ansätze hierfür sind die Implementierung eines Eisenkerns aus einer Eisen-Kobalt-Legierung, die Verkleinerung des Ankerstellwegs mit Hilfe einer Passscheibe, die Implementierung von optimierten Spulen und die Erhöhung des Spulenstroms durch die Anpassung der Leistungselektronik. Nach Abschluss der Entwicklungsarbeit des Autors wurde ein optimierter Prototyp von Umbra Cuscinetti S.p.A. getestet, mit dem durch die Erhöhung des Spulenstroms auf 89 A das Entkuppeln bei ±50 kN gelang. Ferner wurden die Entkoppelungsvorgänge während den Lebensdauertests wiederholt, was die Erfüllung der Anforderungen 2.1 und 3.1 bestätigt. Der Aufbau des optimierten Prototyps und die Messergebnisse sind in [TORO16] und [BACHMANN16B] beschrieben.

7.3 Experimentelle Untersuchungen zu den irreversiblen Linearkupplungen

7.3.1 Vorgehensweise und Methoden

Im Wesentlichen lassen sich die experimentellen Untersuchungen in pneumatische Vorversuche, pyrotechnische Vorversuche, Experimente zu pyrotechnisch betätigten Entkoppelungsvorgängen und Robustheitsversuche aufteilen. Bild 7.5 verdeutlicht die experimentelle Vorgehensweise und die Beziehungen zwischen den experimentellen Methoden.

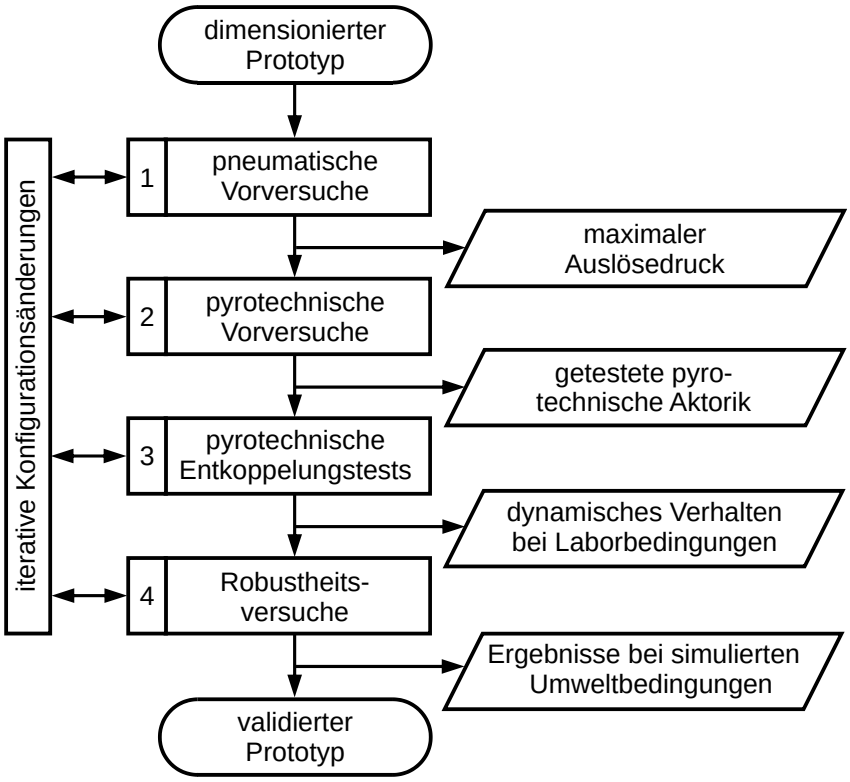


Bild 7.5: Vorgehensweise bei den experimentellen Untersuchungen mit pyrotechnisch betätigten Prototypen

Die Experimente beginnen mit den pneumatischen Vorversuchen, bei denen Druckluft zur Betätigung der Entkoppelungsvorgänge zum Einsatz kommt. Wie in Kapitel 7.1 beschrieben, erfolgt die Druckluftversorgung und -steuerung mit Hilfe eines Druckluftbehälters und einer pneumatischen Anlage. Durch das manuelle Öffnen eines Ventils wird eine voreingestellte Gasmenge in die Druckkammer der Kupplung geleitet, sodass der Gasdruck bis zum Auslösen des Entkuppelns ansteigt. Das Hauptziel der pneumatischen Vorversuche ist die Identifikation des Auslösedrucks bei unterschiedlichen Vorspannkräften. Auch wenn pneumatische Betätigungen für gewöhnlich langsamer sind als pyrotechnische, lassen sich bereits bei diesen Vorversuchen Erkenntnisse über den Entkoppelungsvorgang gewinnen. Gleiche Bauteile von unterschiedlichen Herstellern oder Materialvariationen der Bauteile können bei Bedarf mit pneumatischen Vorversuchen ausreichend genau und weitgehend zerstörungsfrei untersucht werden.

Bei den folgenden pyrotechnischen Vorversuchen, den sogenannten „closed bomb tests“, werden transiente Druckverläufe bei blockierter Sperrhülse gemessen. Während für diese Messaufgabe die Aufzeichnung des Drucks p relevant ist, entfällt die Überwachung der Kraft F_{ax} und der Positionssignale x_H und x_{KGT}. Für diese Versuche wird die Menge des pyrotechnischen Pulvers derart gewählt, dass der durch einen Gasgenera-

tor erzeugte Gasdruck sicher den maximalen Auslösedruck übersteigt. Das Verhältnis von maximalem pyrotechnischem Gasdruck zu maximalem Auslösedruck gilt als Sicherheit für die pyrotechnische Aktorik, wobei das Hauptziel der pyrotechnischen Vorversuche der Funktionsnachweis einer Aktorik mit adäquater Sicherheit, d. h. im Wertebereich von 1,5 bis 2,5, ist. Zwei Druckkammergrößen mit unterschiedlichen Sperrhülsen werden direkt am ersten Funktionsdemonstrator im Rahmen der „closed bomb tests“ experimentell untersucht. Bild 7.6 zeigt den Versuchsbau, bei dem das Druckkammervolumen mittels einer Befestigungshülse konstant gehalten und das Entkuppeln unterdrückt wird. Bei ausreichender statischer Dichtheit lassen sich die pyrotechnischen Vorversuche vor allem mit der Menge und Art des gezündeten Pulvers, den Materialien und Wandstärken der Druckkammer, dem Druckkammervolumen und der -oberfläche beeinflussen.

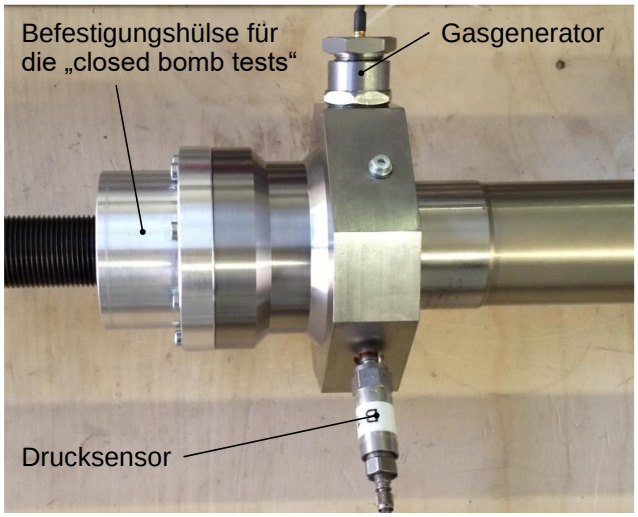


Bild 7.6: Versuchsaufbau für die „closed bomb tests“

Die anschließenden Experimente zu den pyrotechnisch betätigten Entkoppelungsvorgängen zielen auf die Charakterisierung des dynamischen Verhaltens und auf die experimentellen Nachweise von kritischen Anforderungen ab. Folgende Anforderungen werden mit Hilfe dieser Experimente analysiert:

- Anforderung 2.1 zum Entkuppeln des Antriebsstrangs
- Anforderung 2.2 zur maximalen Schaltzeit
- Anforderung 3.1 zur Lastgrenze und zum Kraftbereich vor dem Entkuppeln
- Anforderung 4.1 zum analogen oder digitalen Schaltsignal
- Anforderung 4.2 zur Betätigung des Entkuppelns durch zwei unabhängige Signale
- Anforderung 5.1 zum Abdecken aller kritischen Klemmfälle

Zu Beginn ist der initiale Zustand, d. h. die Vorspannung der Kupplung vor dem Entkuppeln, mittels des Spindelhubgetriebes und des Kraftsignals F_{ax} manuell einzustellen. Mehrere Tests mit unterschiedlichen Vorspannkräften decken den in Anforderung 3.1 definierten Kräftebereich zwischen minimaler und maximaler Lastgrenze ab. Nach der Betätigung der Kupplung stellen der Druckaufbau in der Druckkammer und die Verschiebung der Hülsenbaugruppe hochdynamische Vorgänge während des Schaltens dar, zu deren Beschreibung die Messgrößen p und x_H aufgezeichnet werden. Den Zeitpunkt des erfolgreichen Entkuppelns ermittelt das Positionssignal x_{KGT}, mit dem sich die Anforderung 2.2 zur maximalen Schaltzeit überprüfen lässt. Die Anforderungen zum Entkuppeln des Antriebsstrangs, zum digitalen oder analogen Schaltsignal, zur Betätigung des Entkuppelns durch zwei unabhängige Signale und zum Abdecken aller kritischen Klemmfälle werden hier experimentell nachgewiesen.

Nach dem dritten Schritt dieser Vorgehensweise ist eine Analyse zu den harten Umweltbedingungen durchzuführen, wie sie im Laufe eines Hubschrauberlebens auftreten können. Für den aktuellen Entwicklungsstand stehen erste Aussagen über ein robustes Verhalten der Kupplung im Vordergrund, sodass Zertifizierungstests für luftfahrttaugliche Produkte noch als zu aufwendig und kostenintensiv betrachtet werden. Stattdessen zielen die Robustheitsversuche mit Funktionsdemonstratoren auf die Nachahmung von harten Umweltbedingungen mit Hilfe des in Kapitel 7.1 beschriebenen Prüfstands ab. Ein Beispiel ist die Simulation von erhöhter Reibung, wie sie bei tiefen Temperaturen von -45 °C auftritt. Die Versuchsdurchführung erfolgt, indem die Sperrelemente mit dem Ausgangskolben, der Kugelgewindemutter und der Hülsenbaugruppe verklebt werden (siehe [Naubert14A]).

7.3.2 Messergebnisse

Zunächst wurden die pneumatischen Vorversuche zur Ermittlung des Auslösedrucks durchgeführt, deren Ergebnisse in Tabelle 7.2 zusammengefasst sind.

Vorspannkräfte / kN	Auslösedruck / bar
-40	33,0
-30	20,2
-20	14,4
-5	11,3
5	12,2
20	16,3
30	22,0
40	30,9

Tabelle 7.2: Gemessener Auslösedruck in Abhängigkeit von den eingestellten Vorspannkräften

Diese zeigen die Abhängigkeit des Auslösedrucks von den eingestellten Vorspannkräften, wobei mit steigendem Kraftbetrag sich im Allgemeinen der Auslösedruck erhöht. Der maximal erforderliche Wert beträgt bei den durchgeführten Laborversuchen 33,0 bar. Da während eines klemmenden Antriebsstrangs die Vorspannkräfte lediglich durch die Lastgrenzen[21] eingeschränkt werden können, decken die pneumatischen Vorversuche schrittweise die komplette Bandbreite möglicher Vorspannkräfte ab. Bereits bei den pneumatischen Vorversuchen zeichnet sich der Einfluss des Endanschlags in Form von Stoßbelastungen auf die anderen Antriebsstrangkomponenten ab. Zu den untersuchten Endanschlägen gehören verkeilende Ringe, vorgestauchte Wabenstrukturen und Wabenstrukturen mit Aussparungen. Jedoch erfüllen nur die vorgestauchten Wabenstrukturen die gewünschte Absorption der kinetischen Hülsenbaugruppenenergie, während die anderen Alternativen einen starken Stoß auf den Ausgangskolben verursachen. Fortan werden ausschließlich vorgestauchte Wabenstrukturen als Endanschlag verwendet.

Der maximal erforderliche Auslösedruck von 33,0 bar aus den pneumatischen Vorversuchen muss mittels eines Gasgenerators sichergestellt werden. Hierzu dienen die pyrotechnischen Vorversuche, die sogenannten „closed bomb tests“, bei denen unterschiedlich gefüllte Gasgeneratoren jeweils in fixierten Druckkammern gezündet werden. Bild 7.7 zeigt den Druckverlauf der favorisierten Konfiguration mit 550 mg $BKNO_3$ als Treibladung und dem Druckkammervolumen von 11,3 cm^3.

[21] Im Laufe der Entwicklung wurden die Lastgrenzen von ±40 kN auf ±50 kN geändert. Nach dieser Änderung wurden die pneumatischen Vorversuche nicht wiederholt.

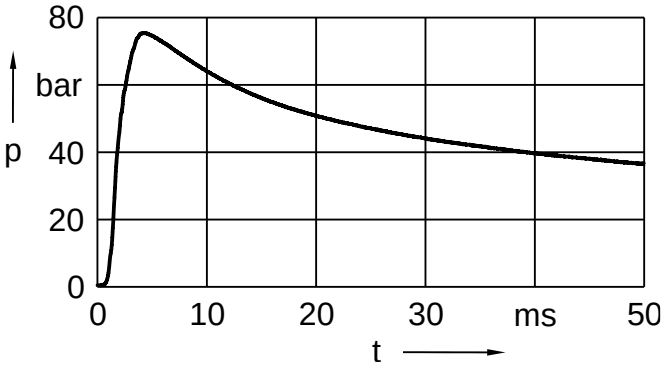


Bild 7.7: Druckverlauf eines pyrotechnischen Vorversuchs mit 550 mg $BKNO_3$ und einem Druckkammervolumen von 11,3 cm^3

Nach Zündung bei t = 0 ms und folgender chemischer Reaktion, baut sich der Gasdruck in der Druckkammer auf, bis er den Maximalwert von 75,4 bar erreicht. Danach dominiert die Wärmeübertragung vom heißen Gas zu den Druckkammerwänden, sodass der Gasdruck infolgedessen sinkt. Die Sicherheit hinsichtlich eines erfolgreichen Entkuppelns entspricht dem Verhältnis maximaler Gasdruck bei pyrotechnischer Betätigung zu maximaler Auslösedruck bei den pneumatischen Vorversuchen und ergibt:

$$S_{Entkuppeln} = \frac{75,4}{33,0} = 2,28 \tag{7.1}$$

Nach diesen Vorversuchen folgen die pyrotechnisch betätigten Entkoppelungsvorgänge, zu denen Bild 7.8 exemplarisch ein Messergebnis zeigt. Anfangs ist die Kupplung mit der Lastgrenze[22] auf Druck beansprucht. Dies wird mit dem Messsignal F_{ax} des Kraftsensors aufgenommen. Sowohl der Druck p in der Druckkammer als auch die Hülsenposition x_H werden mit den dazugehörigen Sensoren aufgezeichnet. Nach der elektrischen Zündung eines Gasgenerators bei t = 0 ms steigt der Druck p in der Druckkammer bis über den maximalen Auslösedruck kontinuierlich an. Die Hülsenbaugruppe wird anschließend ab dem Zeitpunkt t = 2,6 ms verschoben. Durch die Expansion des heißen Verbrennungsgases bei fortschreitender Hülsenbaugruppenbewegung und aufgrund der Wärmeübertragung an die Druckkammerwand fällt der Gasdruck p in der Druckkammer danach ab.

[22] Im Laufe der Entwicklung wurden die Lastgrenzen von ±40 kN auf ±50 kN geändert. Die gesteigerte Lastgrenze wurde mit dem überarbeiteten Prototyp untersucht.

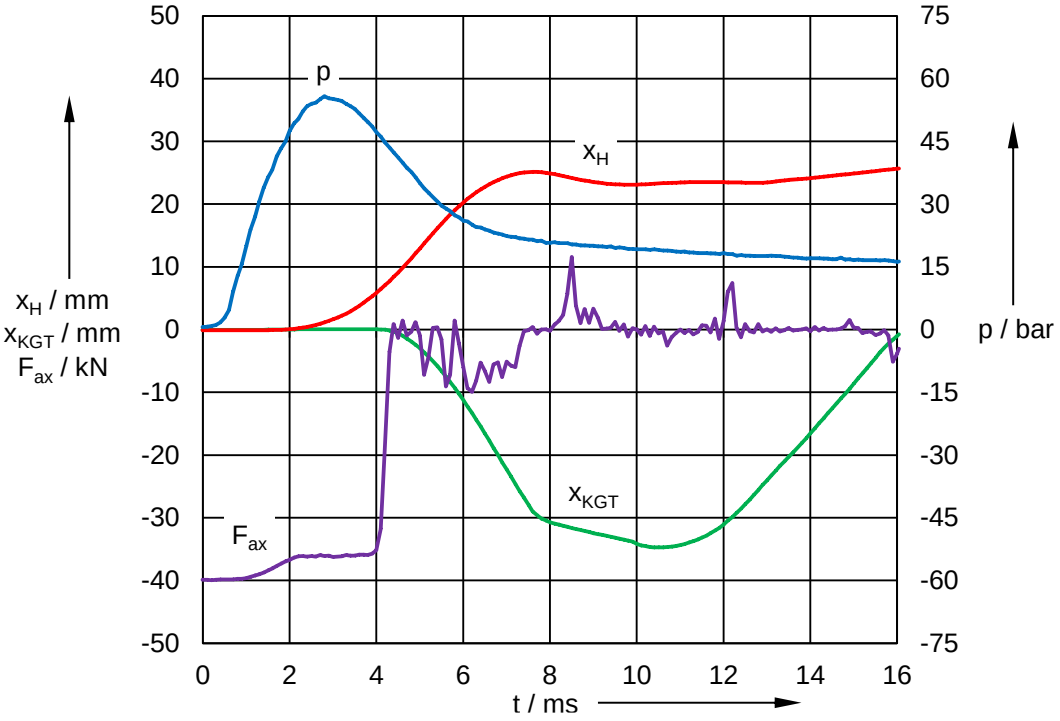


Bild 7.8: Dynamisches Verhalten der pyrotechnisch betätigten Linearkupplung

Beim Erreichen der Schaltzeit t_S = 4,4 ms ist die Hülsenbaugruppe ausreichend weit verschoben, um die Sperrelemente in radialer Richtung frei zu geben und diese mittels von außen auf die Kupplung wirkenden Axialkräften zu entriegeln. Durch die Trennung des Kraftflusses fällt das Kraftsignal F_{ax} gegen Null und das Positionssignal x_{KGT} des klemmenden Kugelgewindetriebs beginnt zu schwingen (siehe grüne Kurve in Bild 7.8 ab t_S = 4,4 ms). Die anschließende Absorption der kinetischen Hülsenbaugruppenenergie mittels der vorgestauchten Wabenstruktur (siehe Bild 7.9 links) spiegelt sich im Kraftsignal F_{ax} wider, beträgt maximal 25% der Lastgrenze und dauert bis zum Zeitpunkt t = 8 ms an. Der Kraftfluss des Bremsvorgangs verläuft über den Kraftsensor und verursacht aufgrund des maximalen Kraftbetrags von 10 kN keine schädlichen Bauteilverformungen.

Bild 7.9: Vorgestauchte Wabenstruktur im Neuzustand und nach dem Entkuppeln (links), erster irreversibler Prototyp im teilmontierten Zustand (rechts)

Weitere pyrotechnische Experimente bestätigen die Charakteristik der Kupplungsdynamik, wobei kleinere Vorspannkraftbeträge im Allgemeinen zu kürzeren Schaltzeiten führen. Aufgrund dieser erfolgreich durchgeführten Versuche starten die Experimente mit dem optimierten Prototyp mit den pyrotechnisch betätigten Entkoppelungsexperimenten. Wegen der leichteren Bauweise und der geänderten Treibladung (je nach Experiment zwischen 160 mg und 520 mg ZPP) ist ein schnelleres Schalten der Kupplungsbauteile zu erwarten. Allerdings kommt für die Betätigung der Kupplung eine etwas langsamere Elektronik zum Einsatz.

Tabelle 7.3 fasst die durchgeführten Experimente zu den pyrotechnisch betätigten Entkoppelungsvorgängen bei Laborbedingungen zusammen.

Nr.	Prototyp	Vorspann-kräfte	Treibladung	Beschleunigte Masse	Entkop-pelung	Schaltzeit t_S
1.	1. Prototyp	+40 kN	550 mg $BKNO_3$	1460 g	Ja	4,5 ms
2.	1. Prototyp	-40 kN	550 mg $BKNO_3$	1460 g	Ja	4,4 ms
3.	1. Prototyp	+5 kN	550 mg $BKNO_3$	1460 g	Ja	4,0 ms
4.	1. Prototyp	+25 kN	550 mg $BKNO_3$	1460 g	Ja	4,3 ms
5.	2. Prototyp	+50 kN	220 mg ZPP	540 g + 167 g [23]	Nein	-
6.	2. Prototyp	+50 kN	520 mg ZPP	540 g + 167 g [23]	Ja	4,3 ms
7.	2. Prototyp	+50 kN	220 mg ZPP + 160 mg PVAC K006	540 g	Ja	3,9 ms
8.	2. Prototyp	-50 kN	220 mg ZPP + 200 mg PVAC K006	540 g	Ja	3,9 ms
9.	2. Prototyp	0 kN	220 mg ZPP + 200 mg PVAC K006	540 g	Ja	3,8 ms

Tabelle 7.3: Experimente zu pyrotechnisch betätigten Entkoppelungsvorgängen bei Laborbedingungen

Bild 7.10 zeigt den zweiten irreversiblen Prototyp vor und nach dem 7. Experiment.

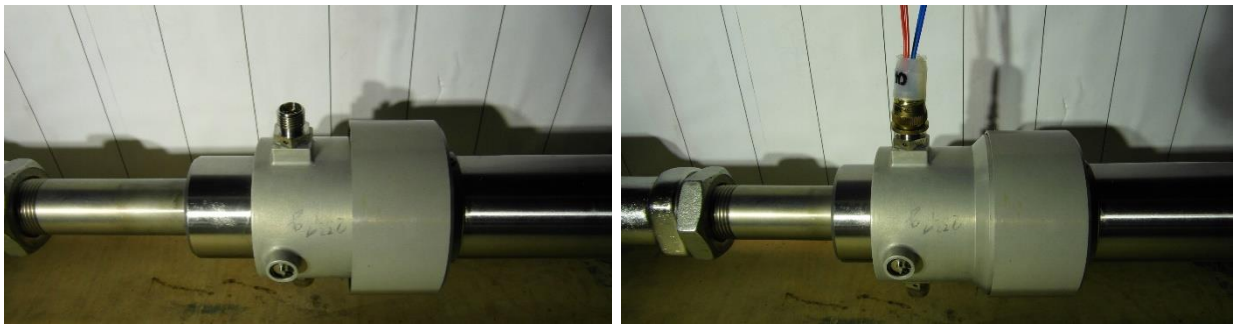


Bild 7.10: Zweiter irreversibler Prototyp vor und nach dem Entkuppeln, 7. Experiment

[23] Bei diesen Versuchen wurde zusätzlich ein 167 g schwerer Adapter zwischen Sperrhülse und Gasgenerator zur gleichzeitigen Aufnahme eines Drucksensors verwendet.

Die vierte experimentelle Methode der in Kapitel 7.3.1 beschriebenen Vorgehensweise umfasst die Robustheitsversuche, bei denen harte Umwelteinflüsse mit der vorhandenen Prüf- und Messeinrichtung simuliert werden (siehe [NAUBERT14A]). Im Speziellen werden die Sperrelemente mit den benachbarten Bauteilen verklebt, um die Reibung – wie bei tiefen Temperaturen – während des Entkuppelns zu erhöhen. Im Vergleich mit den Experimenten unter Laborbedingungen werden nun zwei entgegengesetzte Effekte erwartet. Die Verklebung erhöht einerseits den Widerstand für das Entkuppeln und führt damit zu einem langsameren Schaltvorgang. Andererseits findet der Druckaufbau in der Druckkammer – solange der Auslösedruck noch nicht erreicht wird – länger bei hohem Gasdruck statt, wodurch sich der Druck schneller aufbaut und anschließend die Sperrhülse stärker beschleunigt wird. Letzterer Effekt dominiert, da im Vergleich zu den vorherigen Experimenten der erste irreversible Prototyp mit eingeklebten Sperrelementen ein um ca. 11 % schnelleres Schalten aufweist. Hierzu zeigt Bild 7.9 rechts den teilmontierten Prototypen nach dem Robustheitsversuch bei zuvor eingestellter Vorspannung von 40 kN.

Um das beschriebene Messergebnis (siehe Bild 7.8) mit einer Simulation zu vergleichen, sind die gemessenen und berechneten Werte sowohl zum Druckverlauf als auch zur Hülsenbewegung in Bild 7.11 dargestellt. Die berechneten Werte werden wie in Kapitel 5.4.2 beschrieben ermittelt, wobei der erste pyrotechnische Prototyp die bewegte Masse von 1460 g aufweist.

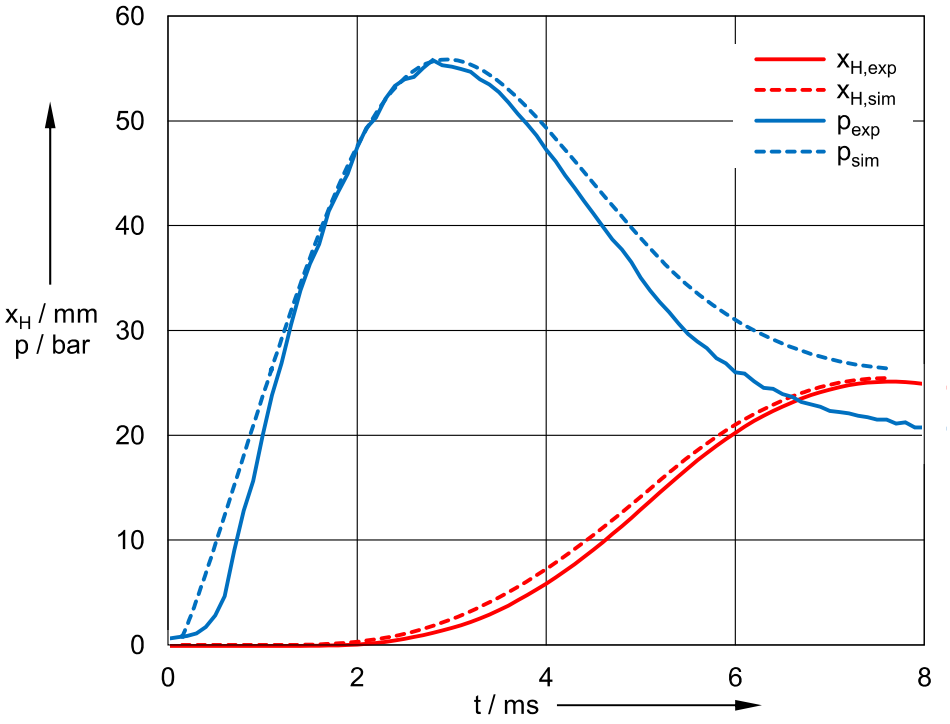


Bild 7.11: Vergleich von Messung und Simulation des pyrotechnischen Entkoppelns

Größtenteils stimmen Simulation und experimentelle Messung überein. Lediglich nach dem Erreichen des maximalen Drucks überschätzt die Berechnung den gemessenen Druckverlauf marginal, was jedoch für das dynamische Verhalten der Linearkupplung irrelevant ist. Eine geringfügige Leckage an den dynamischen Dichtungen oder veränderliche Simulationsparameter können als Ursache für diese Abweichung in Frage kommen. Letztlich führte die Kombination von erfolgreich durchgeführten Simulationen und Experimenten zur zielgerichteten Entwicklung der pyrotechnisch betätigten Linearkupplungen.

7.3.3 Diskussion der Ergebnisse

Werden Axialkräfte zwischen der minimalen und maximalen Lastgrenze vor dem Entkuppeln aufgebracht, erfüllen beide irreversiblen Prototypen vollständig die Anforderung 2.2 zur gewünschten Schaltzeit. Die Tatsache, dass der maximale Gasdruck bei der pyrotechnischen Betätigung mit ausreichendem Abstand über dem maximalen Auslösedruck der Linearkupplung liegt, führt durchgehend zu robusten Entkoppelungsvorgängen. Das schnelle Schalten der mechanischen Bauteile wird sowohl unter Laborbedingungen als auch bei den Robustheitsversuchen mit eingeklebten Sperrelementen erreicht. Weiterführende Tests zur Bruchlastgrenze, zur Steifigkeitsmessung, zur Spielmessung und zur Verträglichkeit bei unterschiedlichen Temperaturen wurden erfolgreich von Umbra Cuscinetti S.p.A. durchgeführt und in [TORO16] dokumentiert.

Des Weiteren ist die konkrete Gestaltung des zweiten irreversiblen Prototyps schon soweit optimiert, dass alle weiteren Anforderungen zumindest theoretisch erfüllt werden.

Ferner bestätigen die vorliegenden Konstruktionen die allgemeinen Vorteile pyrotechnischer Technologien in Sicherheitsanwendungen, die sich durch kompakte Leichtbauweisen, kurze Betätigungszeiten, geringe Bauteilanzahlen und hohe Verfügbarkeiten auszeichnen.

8 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit umfasst die methodische Entwicklung von fremdbetätigten Linearkupplungen und deren experimentelle Funktionsnachweise für das Anwendungsbeispiel der primären Flugsteuerung von Hubschraubern.

Grundlage für diese neuartigen Sicherheitselemente ist das sensorbasierte Erkennen von mechanischen Klemmfehlern, wodurch Gegenmaßnahmen rechtzeitig eingeleitet und kritische Flugsituationen überwunden werden können. Lässt sich ein elektromechanischer Flugsteuerungsaktor aufgrund eines klemmenden Antriebsstrangs nicht mehr bewegen, signalisiert der Flugrechner an die Leistungselektronik der Kupplung, dass ihre Aktorik zu bestromen ist. Durch die Betätigung der Kupplung und dem folgenden Schalten der mechanischen Bauteile wird der Kraftfluss des Antriebsstrangs unterbunden und der Fehler des mechanischen Klemmens in einen Freilauf überführt. In diesem Zustand übernehmen redundante Flugsteuerungsaktoren die Steuerungsfunktion des ausgefallenen Aktors, sodass der Pilot zumindest in eingeschränkter Betriebsweise den Flug fortsetzen und den Hubschrauber sicher landen kann.

Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei auf unterschiedlichen Wirkprinzipien basierende Konstruktionen umgesetzt und experimentell untersucht. Die erste Ausführungsvariante stellt eine elektromagnetisch betätigte Linearkupplung dar, die im Normalbetrieb des Hubschraubers den Kraftfluss über Sperrkugeln formschlüssig leitet und mit einem öffnenden Schaltprinzip arbeitet. Charakteristisch für diese Kupplung ist der mechanische Energiespeicher, der nach seiner durch den Elektromagneten initiierten Freisetzung die notwendige Schaltenergie für die Entkoppelungsvorgänge liefert. Im Vergleich zu Kupplungsantrieben ohne Energiespeicher weist diese Ausführungsvariante den Vorteil auf, dass der Elektromagnet für relativ kleine magnetische Kräfte und sehr kurze Einschaltintervalle dimensioniert und folgerichtig kompakt und leicht ist. Das Zurücksetzen der Kupplung wird in Laborversuchen manuell durchgeführt und erfolgt während automatisierter Vorflugversuche mit Hilfe der redundanten elektromechanischen Flugsteuerungsaktoren. Der erste Prototyp dieser reversiblen Linearkupplung entriegelt hoch belastete (bis zu ±40 kN) Antriebsstränge innerhalb einer maximalen Schaltzeit von 17,5 ms. Mit einer in nachfolgenden Untersuchungen eingesetzten optimierten Variante konnte die geforderte Axialkraft von ±50 kN in ca. 18 ms entkoppelt werden.

Die zweite Ausführungsvariante weist eine pyrotechnische Betätigung auf, arbeitet mit einem öffnenden Schaltprinzip und leitet im Normalbetrieb des Hubschraubers den Kraftfluss formschlüssig über Sperrkugeln. Kennzeichnend für diese Konstruktion sind die geringe Bauteilanzahl, die Implementierung einfacher Komponenten und das niedrige Eigengewicht von 688 g. Bei den experimentellen Funktionsnachweisen erfüllt die pyrotechnisch betätigte Linearkupplung alle Anforderungen. Konkret bedeutet dies, dass diese Ausführungsvariante mit bis zu 50 kN (Zug oder Druck) belastete Antriebsstränge innerhalb einer maximalen Schaltzeit von 4 ms entkuppeln kann. Physikalisch bedingt lassen sich die eingebauten Treibladungen nur einmal aktivieren, sodass während automatisierter Vorflugversuche die funktionale Testbarkeit auf die elektrischen Zündkreisläufe beschränkt ist. Hinsichtlich der Zuverlässigkeit der Baugruppe gilt, dass die verbauten Gasgeneratoren für 8 Jahre ohne Wartung als Stand-by-Komponenten eingesetzt werden können, sofern sie innerhalb dieses Zeitraums nicht aktiviert werden.

Da die mechanischen Schnittstellen beider Prototypen zu den Kugelgewindetrieben der elektromechanischen Flugsteuerungsaktoren einander entsprechen, führt dies zu modularisierten Aufbauten und ermöglicht einen einfachen Austausch beider Kupplungen ohne den Kugelgewindetrieb ändern zu müssen.

Beide Konstruktionen sind somit grundsätzlich für den Einsatz in primären Flugsteuerungssystemen von Hubschraubern geeignet.

9 Ausblick

Aus den experimentellen Funktionsnachweisen folgt, dass die Leistungsfähigkeit der elektromagnetisch betätigten Linearkupplung hinsichtlich des Entkuppelns bei hohen Belastungen kritisch ist und weiter gesteigert werden muss. Dies betrifft in erster Linie die Magnetkraft des Elektromagneten im Einspulenbetrieb, wofür unterschiedliche Lösungsansätze verfolgt werden können. Hierzu können beispielsweise Eisenkerne aus der Eisen-Kobalt-Legierung Vacoflux 50 verwendet werden, mit deren erhöhter Sättigungsflussdichte größere Magnetkräfte erreicht werden. Im Einklang mit dieser Materialänderung erfolgt die Anpassung der Spulen, um eine ganzheitliche Optimierung des magnetischen Kreislaufs zu erzielen. Aufgrund der Tatsache, dass sich der Elektromagnet während der Funktionsnachweise nur marginal erwärmt, kann prinzipiell die Stromdichte noch weiter gesteigert werden. Dies impliziert die Anpassung der Leistungselektronik. Des Weiteren können tribologische und geometrische Änderungen umgesetzt werden, um die Leistungsfähigkeit der reversiblen Kupplung zu erhöhen. Passt man beispielsweise die Kontaktwinkel zwischen dem zweiten Kugelpaket und der Sperrhülse derart an, dass die Reibkräfte an der Ankerhülse reduziert werden, erfordert das Entkuppeln kleinere Magnetkräfte des Elektromagneten. Die unterschiedlichen Magnetkräfte bei der Bestromung der einzelnen Spulen können ferner auf ein Minimum reduziert werden, indem die Spulenwicklungen der beiden Spulen abwechselnd nebeneinander liegen und damit anstelle der beiden räumlich getrennten Spulen eine Gesamtspule mit redundanten Wicklungen realisiert wird.

Ferner können die Linearkupplungen bezüglich höherer oder kleinerer Axialkräfte skaliert werden, sodass sich das Einsatzgebiet neben dem Referenzhubschrauber auf andere Hubschraubertypen ausweiten lässt. Aber auch andere sicherheitskritische Flugsysteme, wie die Fahrwerksaktorik und die Flugsteuerungssysteme von Flugzeugen, erfordern bei ihrer Elektrifizierung das Freischalten klemmender elektromechanischer Antriebsstränge, wofür die entwickelten Linearkupplungen genauso eingesetzt werden können. In Bezug auf eine Verschärfung der Anforderungen ist vor allem bei den Flugsteuerungssystemen von Großraumflugzeugen mit Axialkräften im dreistelligen Kilonewtonbereich zu rechnen. Stoßen dabei die Auffüllvolumen für die Treibladungen der Gasgeneratoren an ihre Grenzen, können zusätzliche Aufsätze das fehlende Volumen liefern, ohne den Gasgeneratortyp ändern zu müssen.

Die pyrotechnisch betätigte Linearkupplung reiht sich in die weit verbreiteten pyrotechnischen Technologien für Sicherheitsanwendungen ein und zeigt, dass diese Wirkprinzipien für alle schnell schaltenden, leicht bauenden Mechanismen mit der Einschränkung des einmaligen Gebrauchs geeignet sind. Ähnliches gilt für die elektromagnetisch betätigte Linearkupplung, deren Vorteile der Reversibilität und der vollständigen funktionalen Testbarkeit auf Kosten eines etwas höheren Gewichts realisierbar sind. Neben den in großer Vielzahl vorkommenden Wellenkupplungen könnten diese Linearkupplungen ein existierendes Produktportfolio für den allgemeinen Maschinen- und Anlagenbau gewinnbringend ergänzen und Produktnischen abdecken.

Literaturverzeichnis

ALBERS04 Albers, A; Arslan, A.: *Potentialabschätzung von Belägen aus monolithischer Keramik in trockenlaufenden Friktionssystemen und die Auswirkungen auf die Systemkonstruktion*. digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/documents/2178, zuletzt geprüft am 16.02.2016

ALBERS11 Albers, A.; Bernhardt, J.; Ott, S.: Potentiale ingenieurskeramischer Friktionswerkstoffe in schaltbaren Kupplungen. In: Albers, A. (Hrsg.): *VDI-Fachtagung Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben 2011*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2011, S. 129-138.

AUDI07 N. N.; Audi AG I/VK-5 (Hrsg.): *Audi Insassenschutz – Passive Systeme*: Selbststudienprogramm 410. http://www.volkspage.net/technik/ssp/ssp/SSP_332.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2015

AUDI12 N. N.; Audi AG Fahrzeugsicherheit I/EK-5 (Hrsg.): *Rettungsleitfaden: Hinweise zur Unfallrettung aus verunfallten Audi Fahrzeugen*. http://www.audi.de/dam/nemo/models/misc/special-purpose-vehicles/PDF/Rettungsleitfaden_DE.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2015

BACHMANN16A Bachmann, M.; Toro, S.: *Improved protoypes of the disconnect devices realised and delivered*. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2016 (Deliverable 3.4). – Forschungsbericht. 7. EU-Forschungsrahmenprogramm. Projektträger Clean Sky Systems for Green Operations SGO, CS-GA-2012-01-FASTDISC-323516.

BACHMANN16B Bachmann, M.: *Project Documentation*. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2016 (Deliverable 3.5). – Forschungsbericht. 7. EU-Forschungsrahmenprogramm. Projektträger Clean Sky Systems for Green Operations SGO, CS-GA-2012-01-FASTDISC-323516.

BACHMANN16C Bachmann, M.: *Final Documentation*. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2016 (Deliverable 3.6). – Forschungsbericht. 7. EU-Forschungsrahmenprogramm. Projektträger Clean Sky Systems for Green Operations SGO, CS-GA-2012-01-FASTDISC-323516.

BEMENT95 Bement, L.; Schimmel, M.: *A Manual for Pyrotechnic Design, Development and Qualification*, National Aeronautics and Space Administration. Hampton: Langley Research Center, 1995 (110172). – NASA Technical Memorandum.

BEMENT99 Bement, L.; Multhaup, H.: Determining Functional Reliability of Pyrotechnic Mechanical Devices. In: *AIAA Journal* 37 (1999),

	Nr. 3, S. 357-363.
BERNELIN08	Bernelin, M.-C.: General overview of Dassault Pyrotechnical devices for Space Applications. In: *7th ESA CNES International Workshop on Space Pyrotechnics*, Noordwijk, 2008, S. 182-208.
BILDSTEIN14	Bildstein, M.: A Built-in Testable Jam Release Device for Electromechanical Actuators in Flight Control Application. In: Maré, J.-C.; et al. (Hrsg.): *6th International Conference on Recent Advances in Aerospace Systems and Components*, Toulouse: Service Communication, 2014, S. 105-108.
BINZ14	Binz, Hansgeorg: Methoden der Produktentwicklung – 7 Ausarbeiten. Stuttgart, Universität, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Umdruck zur Vorlesung, 2014.
CARMODY02	Carmody, C.; Goglia, J.: *Loss of Control and Impact with Pacific Ocean Alaska Airlines Flight 261 McDonnell Douglas MD-83, N963AS About 2.7 Miles North of Anacapa Island, California January 31, 2000*, National Transportation Safety Board. Washington: National Technical Information Service, 2002 (NTSB/AAR-02/01, PB2002-910402). – Aircraft Accident Report.
CHANG02	Chang, K. Y.: Pyrotechnic devices, shock levels and their applications. In: *Pyroshock Seminar, 9th International Congress on Sound and Vibrations*. Orlando, 2002, S. 1-12.
CHEVALIER10	Chevalier, P.; Grac, S.; Liégois, P.: More Electrical Landing Gear Actuation Systems. In: Maré, J.-C.; et al. (Hrsg.): *4th International Conference on Recent Advances in Aerospace Systems and Components*, Toulouse: Service Communication, 2010, S. 9-16.
CHRISTMANN10	Christmann, M.; Seemann, S.; Jänker, P.: Innovative approaches to electromechanical flight control actuators and systems. In: Maré, J.-C.; et al. (Hrsg.): *4th International Conference on Recent Advances in Aerospace Systems and Components*, Toulouse: Service Communication, 2010, S. 17-23.
CLEANSKY12	N. N.; Clean Sky (Hrsg.): *SGO Call for proposals presentation*. http://www.cleansky.eu/sites/default/files/documents/calls/infoday20120706/6_-20120706_-_sgo_call13_infoday.pdf, zuletzt geprüft am 07.03.2017.
COBHAM09	N. N.; Cobham Life Support (Hrsg.): *Cable Cutters: The most important thing we build is trust*. http://www.cobham.com/80th-anniversary/cobham-the-company.aspx, zuletzt geprüft am 27.11.2015.
DE102009016797A1	Schutzrecht DE102009016797 A1 (14.10.2010). Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH
DE102011118240A1	Schutzrecht DE102011118240 A1 (16.05.2013). Liebherr-

	Aerospace Lindenberg GmbH
DESCH11A	N. N.; Desch Antriebstechnik GmbH & Co. KG (Hrsg.): *DESCH Conax / Planox – Reibkupplungen in Landmaschinen*. http://www.desch.de/de-wAssets/docs_en/pt/brochures/Prospekt_LM_11_D_GB_K.pdf, zuletzt geprüft am 22.02.2016
DESCH11B	N. N.; Desch Antriebstechnik GmbH & Co. KG (Hrsg.): *DESCH Conax®-Kupplungen*. http://www.desch.de/de-wAssets/docs/pt/pt_desch_cm_2011_d_k.pdf, zuletzt geprüft am 29.03.2016
DOMKE15	Domke, B.: *Main rotor head and swashplate assembly, main transmission deck detail*. http://www.b-domke.de/AviationImages/Rotorhead/14332.html, zuletzt geprüft am 26.08.2015.
DÜBBELDE08	Dübbelde, D.: *PYROTAK - Notöffnungssystem*, Deprag Schulz GmbH & Co. Amberg: Pressestelle Deprag Schulz GmbH & Co., 2008 (DP-DE-PI-2008-07). – Fachartikel. BFS-Förderprogramm PYROTAK. Projektträger Eurocopter Deutschland GmbH EXDE3.
EISWIRTH15	Eiswirth, M.: *Entwicklung von einer pneumatisch betätigten linearen Schaltkupplung*. Stuttgart, Universität, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Bachelorarbeit, 2015.
EP2112402A1	Schutzrecht EP2112402 A1 (28.10.2009). Messier-Bugatti
EP2193286B1	Schutzrecht EP2193286 B1 (28.12.2011). EADS Deutschland GmbH
EP2837556A1	Schutzrecht EP2837556 A1 (18.02.2015). EADS Deutschland GmbH
EP2840020A2	Schutzrecht EP2840020 A2 (25.02.2015). EADS Deutschland GmbH
EP2891827A2	Schutzrecht EP2891827 A2 (08.07.2015). EADS Deutschland GmbH
FARPART25	FARPart25 September 2015. *Airworthiness Standards: Transport Category*. Washington: U. S. Government Publishing Office.
FELDHUSEN13	Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre.* 8. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2013. – ISBN 978-3-642-29568-3
GOODRICH15	N. N.; UTC Aerospace Systems (Hrsg.): *Actuation & Propeller Systems*. http://utcaerospacesystems.com/cap/systems/Documents/actuation-propeller-systems.pdf, zuletzt geprüft am 26.08.2015.
GROTE07	Grote, K.-H.; et al.: *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. 22. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 2007. – ISBN 978-3-540-49714-1

HABERHAUER14 Haberhauer, H.; Kaczmarek, M.: *Taschenbuch der Antriebstechnik*. 1. Aufl. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014. – ISBN 978-3-446-42770-9

HIHOUD12 Hihoud, M.; Pagès, A.; Benoit, C.; Claeyssen, F.: BRUCE – Electromagnetic Actuated Pin Puller. In: Borgmann, H. (Hrsg.): *13th International Conference on New Actuators & 7th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems*. Bremen, WFB Wirtschaftsförderung Bremen GmbH, 2012, S. 478-481.

HÖNER15 Höner, S.: *Specification for Validation Testing*. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2013 (Deliverable 2.3). – Forschungsbericht. 7. EU-Forschungsrahmenprogramm. Projektträger Clean Sky Systems for Green Operations SGO, CS-GA-2012-01-FASTDISC-323516.

HOLLAND08 Holland, G.; McCormick, J.; Rivers, P.: Sustainable Fire Protection for Military Vehicle and Aircraft Applications. In: *FS-World.com Magazine* Spring (2009), Nr. 7, S. 47-57.

HUBER07 Huber, M.: How Things Work: Evacuation Slides. In: *Air & Space Magazine* November (2007), Nr. 9, S. 24-25.

HUBER11 Huber, P.: ÖAMTC Notarzthubschrauber starteten 2010 zu fast 15.000 Einsätzen. In: *Austrian Wings* (2011), http://www.austrianwings.info/2011/01/oamtc-notarzthubschrauber-starteten-2010-fast-15-000-mal-zu-notfallen/, zuletzt geprüft am 26.10.2015.

ISUT16 N. N.; Institut für Strömungstechnik und Thermodynamik: *Kapitel 8 Wärme und Stoffübertragung*. http://www.uni-magdeburg.de/isut/TV/Download/Kapitel_8_Waerme-_und_Stoffuebertragung.pdf, zuletzt geprüft am 11.04.2016

JANG14 Jang, S.; Lee, H.; Oh, J.: Performance Modeling of a Pyrotechnically Actuated Pin Puller. In: *International Journal of Aeronautical and Space Sciences* 15 (2014), Nr. 1, S. 102-111.

JIMÉNEZ12 Jiménez, A.; Novilo, E.; Aguado, F.; Morante, E.: Electromechanical Actuator with Anti-Jamming System for Safety critical aircraft applications. In: Maré, J.-C.; et al. (Hrsg.): *5th International Conference on Recent Advances in Aerospace Systems and Components*, Toulouse: Service Communication, 2012, S. 77-82.

KALLENBACH12 Kallenbach, E.; et al.: *Elektromagnete – Grundlagen, Berechung, Entwurf und Anwendung.* 4. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012. – ISBN 978-3-8348-0968-1

KEB15 N. N.; Karl E. Brinkmann GmbH (Hrsg.): *Magnettechnik*. http://www.keb.de/de/produkte/magnettechnik/kupplungen-und-bremsen.html, zuletzt überprüft am 16.02.2016

LEE09 Lee, H.: Modeling of a Hydrualically Damped Pyrotechnic Actuator. In: *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including*

The New Horizons Forum and Aerospace Exhibition 14 (2009). Nr. 1, S. 8777-8786.

LELL05 Lell, P.; Pyroglobe GmbH (Hrsg.): *Datenblatt und Funktionsbeschreibung des Pinpullers*. http://pyroglobe.net/datenblaetter/Pinpuller/PP9x77x12/Pinpuller_Datenblatt%20und%20Funktionsbeschreibung_17-2-2005.pdf, zuletzt geprüft am 05.06.2016.

LELL13 Lell, P.; Pyroglobe GmbH (Hrsg.): *Sammeldatenblatt des Gasgenerators GG821*. 12-1_GG821_Datenblatt Paroglobe_3-11-2013.pdf, vom 31.10.2013.

LELL14 Lell, P.; Pyroglobe GmbH (Hrsg.): *Zuverlässigkeitsberechnung für die Baugruppe GG821*. Zuverlässigkeitsberechnung für GG821_15-12-14_Gesamtausdruck.xls, vom 15.12.2014.

LEONHARDT12 Loenhardt, D.: *Jahresbericht 2011*, Bayerische Forschungsstiftung. München: Bayerische Forschungsstiftung, 2012 (BFS Jahresbericht 2011). – Jahresbericht. BFS-Förderprogramm PYROTAK. Projektträger Eurocopter Deutschland GmbH EXDE3.

LIEBHERR15 N. N.; Liebherr-Aerospace & Transportation SAS (Hrsg.): *Liebherr-Systems for Helicopters*. https://www.liebherr.com/shared/media/aerospace-and-transportation/aerospace/downloads/brochures/aets-brochures-aer/liebherr-systems-for-helicopters-brochure.pdf, zuletzt geprüft am 26.08.2015.

MAREK07 Marek, R.; Nitsche, K.: *Praxis der Wärmeübertragung: Grundlagen - Anwendungen - Übungsaufgaben*. 4. Aufl. Leipzig: Carl Hanser Ver-lag, 2007. – ISBN 978-3-446-44499-7

MCGOWEN05 McGowen, S.; Tucker, S.: *Helicopters*. 1. Aufl. Santa Barbara: ABC-Clio Inc., 2005, ISBN: 1-85109-468-7

MELZ15 Melz, T.: *Entwicklung einer „intelligenten“ Kupplung auf Basis von Formgedächtnislegierungen*. http://www.adaptronik.fraunhofer.de/de/projects/intelligent.html, zuletzt geprüft am 08.12.2015

NAUBERT12 Naubert, A.; Christmann, M.; Jänker, P.; Binz, H.: Pyrotechnic Jam-Relief Mechanism for Electromechanical Actuators in Flight Control Applications. In: Borgmann, H. (Hrsg.): *13th International Conference on New Actuators & 7th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems*. Bremen, WFB Wirtschaftsförderung Bremen GmbH, 2012, S. 470-473.

NAUBERT13A Naubert, A.; Christmann, M.; Jänker, P.; Binz, H.: Anti-Jamming Pyromechanism for Electromechanical Actuators. In: Estorff, O. ; Thielecke, F. (Hrsg.): *4th International Workshop on Aircraft System Technologies (AST 2013)*. Hamburg, Shaker Verlag, 2013, S. 139-147.

NAUBERT13B Naubert, A.: *Approved Requirement Specification*. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design. Stuttgart:

Universität Stuttgart, 2013 (Deliverable 1.1). – Forschungsbericht. 7. EU-Forschungsrahmenprogramm. Projektträger Clean Sky Systems for Green Operations SGO, CS-GA-2012-01-FASTDISC-323516.

NAUBERT14A Naubert, A.; Binz, H.; Bachmann, M.; Christmann, M.: Testing of a Pyrotechnically Actuated Mechanism in Safety Applications. In: Borgmann, H. (Hrsg.): *14th International Conference on New Actuators & 8th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems*. Bremen, WFB Wirtschaftsförderung Bremen GmbH, 2014, S. 318-321.

NAUBERT14B Naubert, A.; Dennig, H.; Höner, S.; Lell, P.: *Report about the concept studies for disconnect devices and their evaluation results*. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2014 (Deliverable 1.2). – Forschungsbericht. 7. EU-Forschungsrahmenprogramm. Projektträger Clean Sky Systems for Green Operations SGO, CS-GA-2012-01-FASTDISC-323516.

NAUBERT15A Naubert, A.: *Report about the development of the disconnect devices*. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2015 (Deliverable 2.1). – Forschungsbericht. 7. EU-Forschungsrahmenprogramm. Projektträger Clean Sky Systems for Green Operations SGO, CS-GA-2012-01-FASTDISC-323516.

NAUBERT15B Naubert, A.: *Cost Estimation Report for the Irreversible Design*. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2015 (Deliverable 2.1). – Forschungsbericht. 7. EU-Forschungsrahmenprogramm. Projektträger Clean Sky Systems for Green Operations SGO, CS-GA-2012-01-FASTDISC-323516.

NAUBERT16A Naubert, A.; Binz, H.; Bachmann, M.; Christmann, M.; Toro, S.; Perni, F.: Disconnect Device Design Options for Jam-Tolerant Electromechanical Actuators. In: Maré, J.-C. (Hrsg.): *7th International Conference on Recent Advances in Aerospace Systems and Components*. Toulouse, Service Communication, 2016, S. 187-192.

NAUBERT16B Naubert, A.: *Disconnect device components realised and delivered.* Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2016 (Deliverable 3.1). – Forschungsbericht. 7. EU-Forschungsrahmenprogramm. Projektträger Clean Sky Systems for Green Operations SGO, CS-GA-2012-01-FASTDISC-323516.

NIEMANN03 Niemann, G.; Winter, H.: *Maschinenelemente – Band 2: Getriebe allgemein, Zahnradgetriebe – Grundlagen, Stirnradgetriebe.* 2. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. – ISBN 978-3-662-11874-0

NIEMANN05 Niemann, G.; Winter, H.; Höhn, B.: *Maschinenelemente – Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen.* 4. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. –

ISBN 3-540-25125-1

NSK16 N. N.; NSK Europe Ltd (Hrsg.): *Schadensdiagnose: Kugelgewindetriebe*. http://www.nskeurope.de/kugelgewindetriebe-136.htm, zuletzt geprüft am 12.06.16

ORTLINGHAUS04 N. N.; Ortlinghaus-Werke GmbH (Hrsg.): *Elektromagnetisch betätigte Kupplungen und Bremsen*. http://www.ortlinghaus.at/pdf/prod_neu/de_register4.pdf, zuletzt geprüft am 11.01.2016

ORTLINGHAUS16 N. N.; Ortlinghaus-Werke GmbH (Hrsg.): *Lamellen. Ortlinghaus Qualität*. http://www.ortlinghaus.com/deutsch/produkte/lamellen/lamellen.html, zuletzt geprüft am 16.02.2016

PARKER01 N. N.; Parker Hannifin Corporation (Hrsg.): *Parker O-Ring Handbook 2001 Edition*. http://www.logwell.com/tech/O-ring/Parker_Handbook.pdf, zuletzt geprüft am 07.04.2016

RATHKE11 Rathke, G.; Kimmig, K.-L.; Müller, B.: Mit Effizienz und Komfort zum Erfolg. In: Albers, A. (Hrsg.): *VDI-Fachtagung Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben 2011*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2011, S. 149-162.

REICHEL11 Reichel, D.; Jonckheere, L.: Die Trennkupplung zum bedarfsgerechten Zuschalten des Kompressors zur Drucklufterzeugung in Nutzfahrzeugen. In: Albers, A. (Hrsg.): *VDI-Fachtagung Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben 2011*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2011, S. 25-34.

RIEGER06 Rieger, D.: *Numerische Modellierung des Aufblasvorgangs eines Airbags und der thermo-chemischen Prozesse im Gasgenerator*. München, Technische Universität, Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungsmechanik, Dissertation, 2006.

RTCA07 RTCA/DO-160F Issue Dezember 2007: *Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment*. Washington: RTCA, Inc.

SACHS12 N. N.; ZF Trading GmbH (Hrsg.): *Technisches Training – Fahrzeugteile im Pkw Antriebsstrang – Aufbau, Funktion und mögliche Schäden*. https://www.zf.com/brands/de_de/sachs/about_sx/brochures_sachs/order_brochures_sx.jsp, zuletzt geprüft am 22.02.2016

SAEAIR5713 SAE AIR 5713 Juli 2008. *In-Service Reliability Data of Continuously Active Ballscrew and Geared Flight Control Actuation Systems*. Berlin: Beuth.

SCHAEFFLER06 N. N.; Schaeffler KG (Hrsg.): *INA Schiebemuffe-Einheit – Technische Produktinformation*. http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/tpi/downloads_8/tpi125_de_de.pdf, zuletzt geprüft am 12.01.2016

SCHAEFFLER13 N. N.; Schaeffler Technologies AG & Co. KG (Hrsg.): *Higher Performance Capacity Through the Use of Coatings*. http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/tpi/downloads_8/tpi186_de_en.pdf, zuletzt geprüft am 26.10.2015

SCHAEFFLER15 N. N.; Schaeffler Technologies AG & Co. KG: *Wälzlagerpraxis: Handbuch zur Gestaltung und Berechnung von Wälzlagern*. 4. Aufl. Zwickau: Vereinigte Fachverlage GmbH, 2015. – ISBN 978-3-7830-0401-4

SHILLITO11 Shillito, P.; AgustaWestland (Hrsg.): *GRC 3.5 EMA Jan 2011 - MR Actuator Dynamic Load + Extension performance specification V2*. Actuator dynamic control Ext-load V2 Jan2011.ppt, vom 10.01.2011.

SCHLECHT07 Schlecht, B.: *Maschinenelemente 1: Festigkeit, Wellen, Verbindungen, Federn, Kupplungen.* 1. Aufl. München: Pearson Studium, 2007. – ISBN 978-3-8273-7145-4

SCHWEIZER16 Schweizer, A. (Hrsg.): *Formelsammlung und Berechnungsprogramme für Anlagenbau*. http://www.schweizer-fn.de/stoff/wuebergang_gase/wuebergang_gase.php, zuletzt geprüft am 11.04.2016

SILVERMAN08 Silverman, F.; Hi-Shear Technology Corporation (Hrsg.): *The PC-23 NSI Commercial Equivalent User's Guide*. www.hstc.com/Download.aspx?ResourceId=28387, zuletzt geprüft am 01.12.2015

SOMMER10 Sommer, K.; Heinz, R.; Schöfer, J.: *Verschleiß metallischer Werkstoffe.* 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2010. – ISBN 978-3-8351-0126-5

STROMAG16 N. N.; Stromag AG (Hrsg.): *Elektromagnet-Zahnkupplungen*. http://www.stromag.de/fileadmin/user_upload/Dokumente/Produktkataloge/Kupplungen/d210_elektromagnet_zahnkupp.pdf, zuletzt geprüft am 11.01.2016

STURM90 Sturm, A.; Förster, R.: *Maschinen- und Anlagendiagnostik: Für die zustandsbezogene Instandhaltung*. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1990. – ISBN 978-3-322-99814-9

TORO15A Toro, S.: *Reliability Prediction Report*. Umbra Cuscinetti S.p.A.. Foligno: UmbraGroup, 2015 (RPR0045). – Forschungsbericht. 7. EU-Forschungsrahmenprogramm. Projektträger Clean Sky Systems for Green Operations SGO, CS-GA-2012-01-FASTDISC-323516.

TORO15B Toro, S.; Umbra Cuscinetti S.p.A. (Hrsg.): *FASTDISC RCD Recurring Cost*. fastdisc RCD recurring cost.xlsx, vom 10.01.2011

TORO15C Toro, S.: *Technical Drawings of Disconnect Devices*. Umbra Cuscinetti S.p.A.. Foligno: UmbraGroup, 2015 (Deliverable 2.2). – Forschungsbericht. 7. EU-

	Forschungsrahmenprogramm. Projektträger Clean Sky Systems for Green Operations SGO, CS-GA-2012-01-FASTDISC-323516.
TORO16	Toro, S.; Naubert, A.; Bachmann, M.: *Functionality of the disconnect devices demonstrated and test report issued*. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2016 (Deliverable 3.3). – Forschungsbericht. 7. EU-Forschungsrahmenprogramm. Projektträger Clean Sky Systems for Green Operations SGO, CS-GA-2012-01-FASTDISC-323516.
US20090193915A1	Schutzrecht US 20090193915 A1 (06.08.2009). Feng-Ho Wang
US7834494B1	Schutzrecht US 7834494 B1 (16.11.2010). The Boeing Company
US8336818B2	Schutzrecht US 8336818 B2 (25.12.2012). Parker-Hannifin Corporation
VDI2221	VDI 2221 Mai 1993. *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Berlin: Beuth Verlag.
VDI2240	VDI 2240 Juni 1971. *Wellenkupplungen: Systematische Einteilung nach ihren Eigenschaften*. Berlin: Beuth Verlag.
VOGT01	Vogt, O.: *Haftreibung und reversierender Gleitverschleiß von Al_2O_3- und Si_3N_4-Keramik in Paarung mit Stahl und Gusseisen*. Karlsruhe, Institut für Angewandte Materialien – Keramische Werkstoffe und Technologien, Dissertation, 2001.
WHITE09	White, G.: A tilt-rotor actuator. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,* Part G: J. Aerospace Engineering (2009), Nr. 224, S. 657-672.
WIKIPEDIA17	N. N.: *Datei:AS332 Super Pum Line Drawing.svg* https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:AS332_Super_Pum_Line_Drawing.svg, zuletzt geprüft am 21.09.2017

Anhang

A.1 Diagramme zu den Entkoppelungsexperimenten mit der reversiblen Linearkupplung

Die folgenden Diagramme stellen die Messwerte zu den Entkoppelungsexperimenten mit der reversiblen Linearkupplung dar. Eine detaillierte Beschreibung der Experimente ist in Kapitel 7.2.2 zu finden.

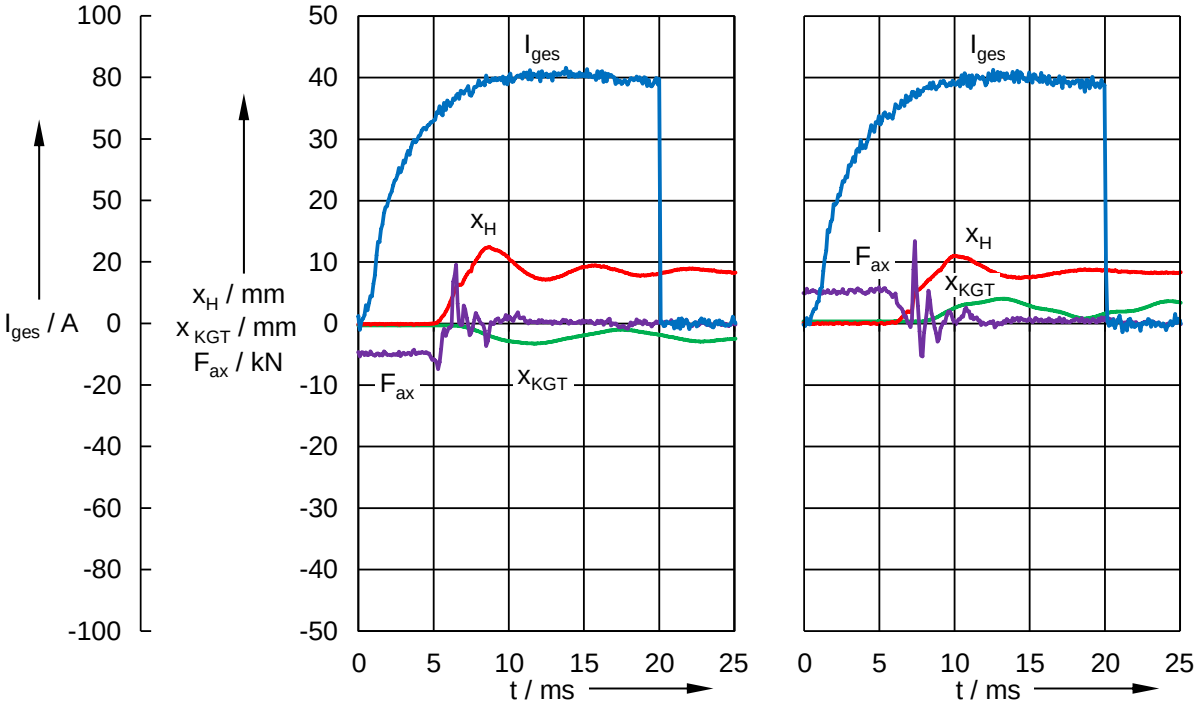


Bild A.1: Dynamisches Verhalten der reversiblen Kupplung bei Vorspannkräften von F_{ax} = -5 kN (links) bzw. F_{ax} = +5 kN (rechts) mit beiden Spulen im Betrieb

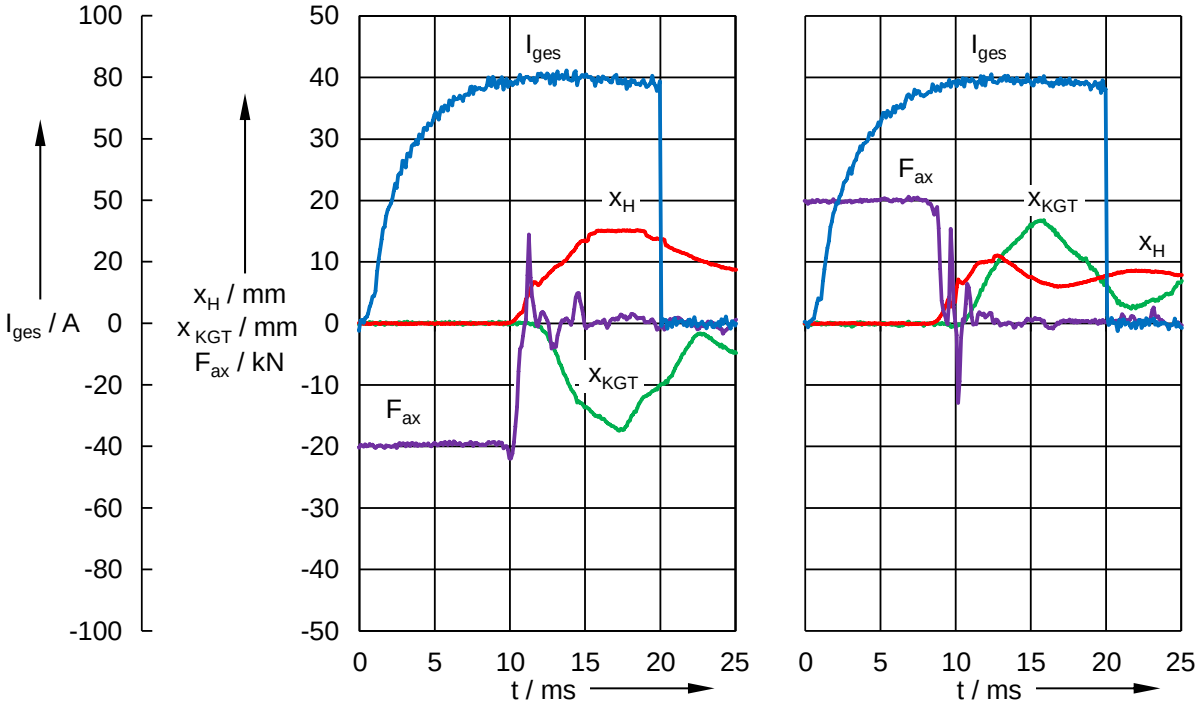


Bild A.2: Dynamisches Verhalten der reversiblen Kupplung bei Vorspannkräften von F_{ax} = -20 kN (links) bzw. F_{ax} = +20 kN (rechts) mit beiden Spulen im Betrieb

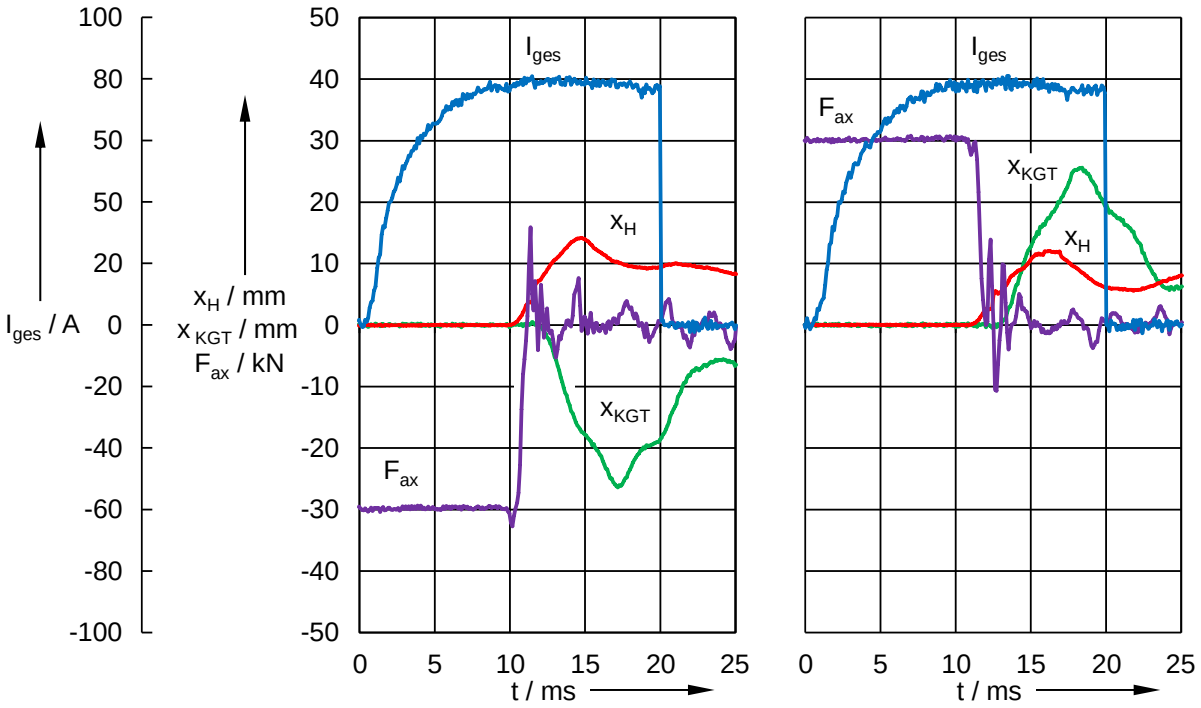


Bild A.3: Dynamisches Verhalten der reversiblen Kupplung bei Vorspannkräften von F_{ax} = -30 kN (links) bzw. F_{ax} = +30 kN (rechts) mit beiden Spulen im Betrieb

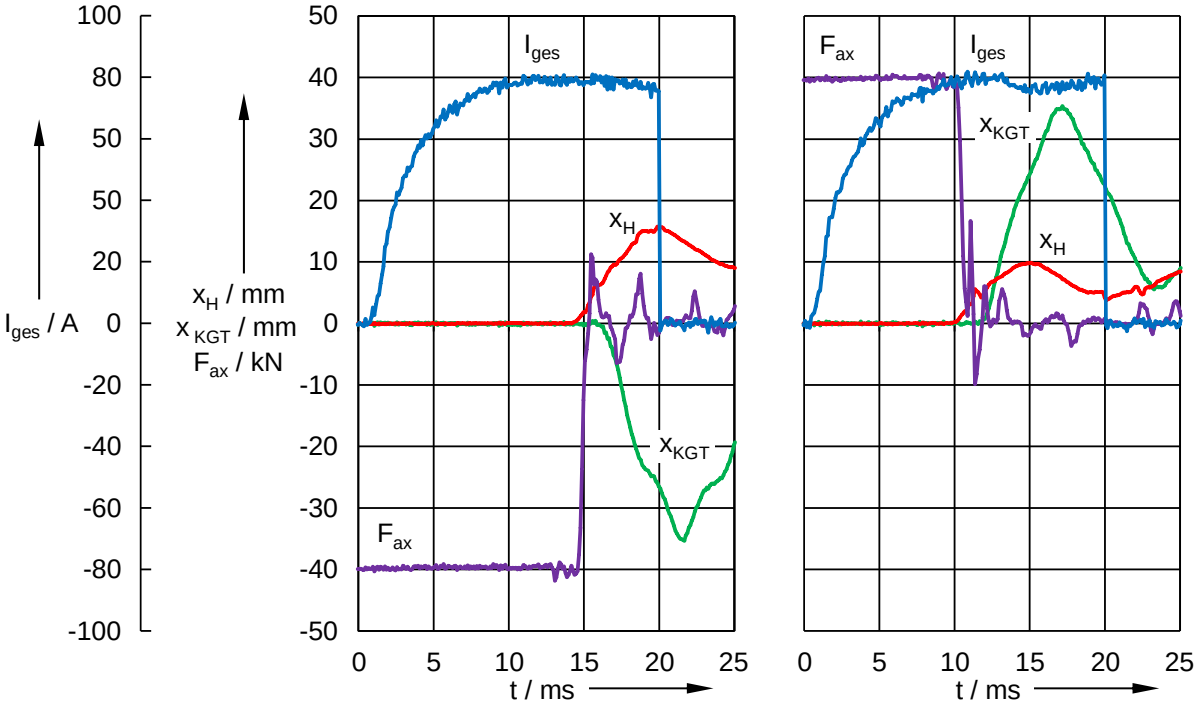


Bild A.4: Dynamisches Verhalten der reversiblen Kupplung bei Vorspannkräften von F_{ax} = -40 kN (links) bzw. F_{ax} = +40 kN (rechts) mit beiden Spulen im Betrieb

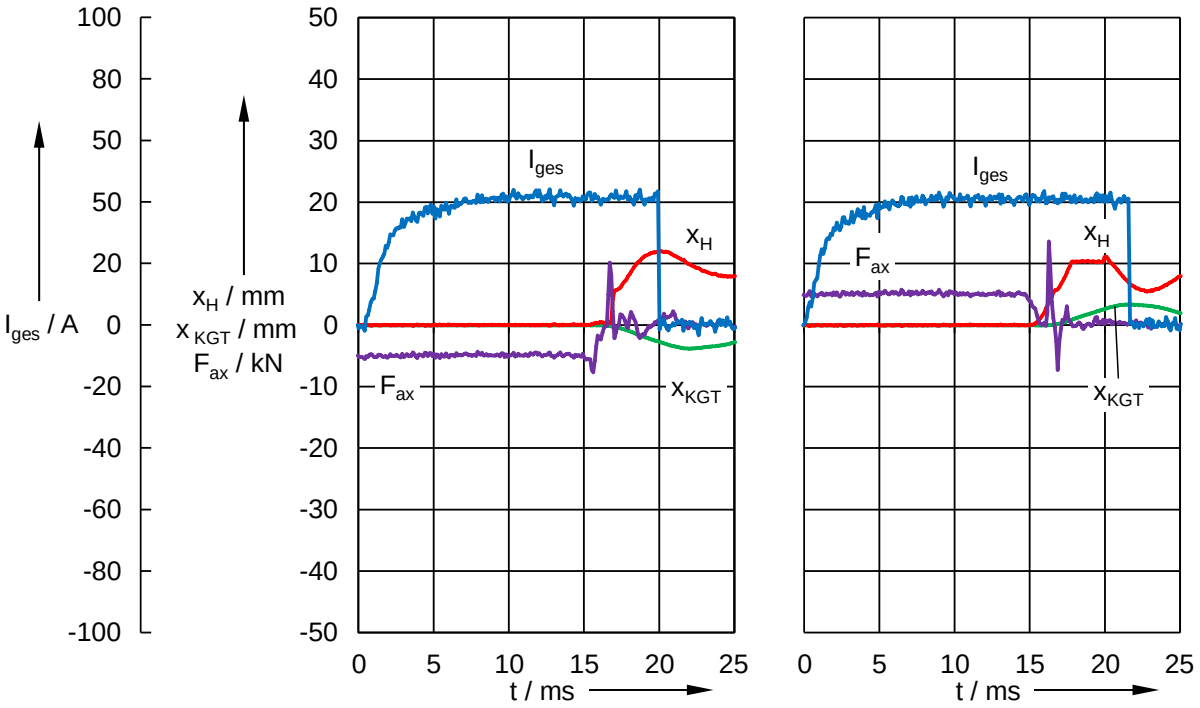


Bild A.5: Dynamisches Verhalten der reversiblen Kupplung bei Vorspannkräften von F_{ax} = -5 kN (links) bzw. F_{ax} = +5 kN (rechts) mit der oberen Spulen im Betrieb

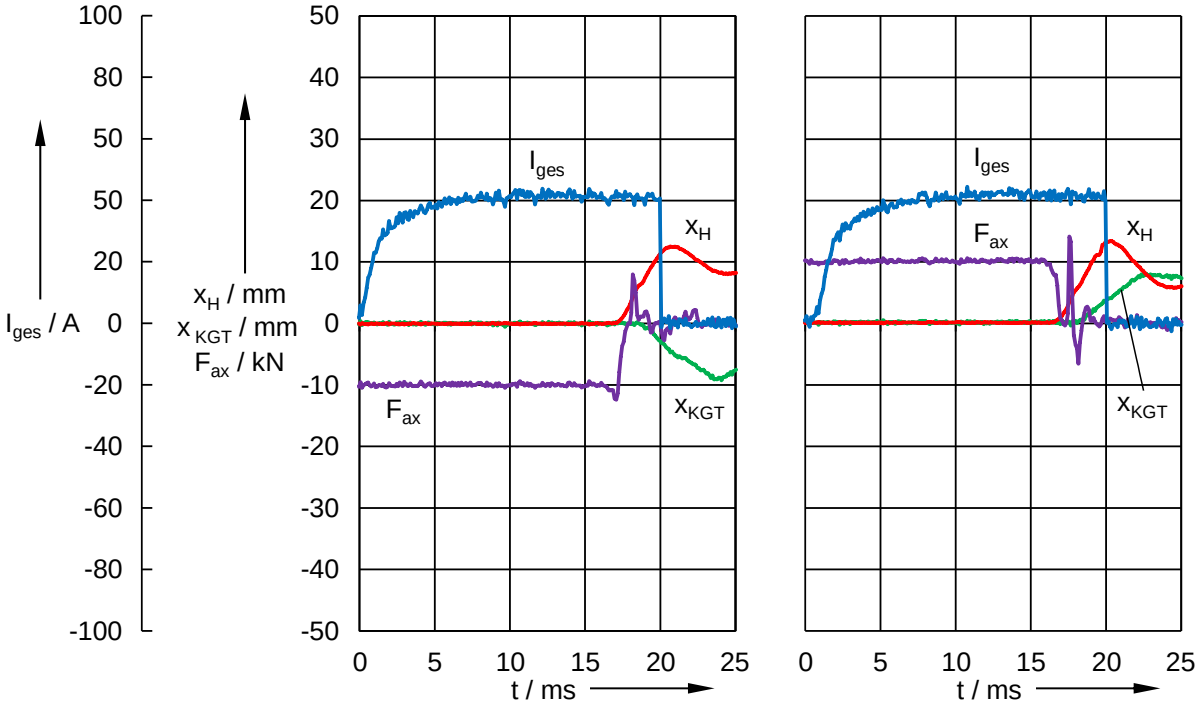


Bild A.6: Dynamisches Verhalten der reversiblen Kupplung bei Vorspannkräften von F_{ax} = -10 kN (links) bzw. F_{ax} = +10 kN (rechts) mit der oberen Spulen im Betrieb

A.2 Urteilsschemata

Im Folgenden sind die Urteilsschemata für die Bewertung der reversiblen und irreversiblen Linearkupplungen aufgelistet (siehe Kapitel 4.1.4 und 4.2.4).

Wertskala		Eigenschaftsgrößen					
Nutz-wert	VDI 2225	Masse der Kupplung	einhüllender Bauraum	Schaltzeit für das Entkuppeln	Einstufung bzgl. Reversibilität & Testbarkeit	Fehlerraten "ungewolltes Auskuppeln" & "fehlerhaftes Entkuppeln"	maximale Betriebs-temperatur für 15 min.
Pkt.	Pkt.	[kg]	[mm^3]	[ms]	[-]	[1/fh]	[°C]
0	0	2	$5{,}0 \cdot 10^6$	50	kein Reset & keine Testbarkeit	$\lambda_1 \cong \lambda_2 \leq 4 \cdot 10^{-6}$	180
1		1,9	$4{,}5 \cdot 10^6$	47			192
2	1	1,8	$4{,}0 \cdot 10^6$	44	kein Reset & begrenzt funktional testbar (Funktionen)	$\lambda_1 \cong \lambda_2 \leq 2 \cdot 10^{-6}$	204
3		1,7	$3{,}5 \cdot 10^6$	41			216
4	2	1,6	$3{,}0 \cdot 10^6$	38	manueller Reset & begrenzt funktional testbar (Funktionen)	$\lambda_1 \cong \lambda_2 \leq 1 \cdot 10^{-6}$	228
5		1,5	$2{,}5 \cdot 10^6$	35			240
6	3	1,4	$2{,}0 \cdot 10^6$	32	automatisiert & begrenzt funktional testbar (Versuchsbeding.)	$\lambda_1 \cong \lambda_2 \leq 5 \cdot 10^{-7}$	252
7		1,3	$1{,}5 \cdot 10^6$	29			264
8	4	1,2	$1{,}0 \cdot 10^6$	26	automatisiert & voll funktional testbar	$\lambda_1 \cong \lambda_2 \leq 2{,}5 \cdot 10^{-7}$	276
9		1,1	$0{,}5 \cdot 10^6$	23			288
10		1	0	≤ 20			300

Wertskala		Eigenschaftsgrößen					
Nutz-wert	VDI 2225	Aufwand zur mechanischen Integration	Aufwand zur Steuerung und Leistungs-elektronik	Wartungs-aufwand	Herstellkosten	Entwicklungs-risiko	Bauteilkom-plexität
Pkt.	Pkt.	[-]	[-]	[-]	[€]	[-]	[-]
0	0	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch	3.500	sehr hoch	sehr hoch
1					3.300		
2	1	hoch	hoch	hoch	3.100	hoch	hoch
3					2.900		
4	2	mittel	mittel	mittel	2.700	mittel	mittel
5					2.500		
6	3	gering	gering	gering	2.300	gering	gering
7					2.100		
8	4	sehr gering	sehr gering	sehr gering	1.900	sehr gering	sehr gering
9					1.700		
10					1.500		

Tabelle A.1: Urteilsschema zu den reversiblen Linearkupplungen

Wertskala		Eigenschaftsgrößen					
Nutz-wert	VDI 2225	Masse der Kupplung	einhüllender Bauraum	Schaltzeit für das Entkuppeln	Einstufung bzgl. Reversibilität & Testbarkeit	Verfügbarkeit vor, während und nach dem Entkuppeln	maximale Betriebs-temperatur für 15 min.
Pkt.	Pkt.	[kg]	[mm^3]	[ms]	[-]	[-]	[°C]
0	0	2	$5{,}0 \cdot 10^6$	50	kein Reset & keine Testbarkeit	$Q_v \cong Q_w \cong Q_n \leq 4 \cdot 10^{-6}$	180
1		1,9	$4{,}5 \cdot 10^6$	47			192
2	1	1,8	$4{,}0 \cdot 10^6$	44	kein Reset & begrenzt funktional testbar (Funktionen)	$Q_v \cong Q_w \cong Q_n \leq 2 \cdot 10^{-6}$	204
3		1,7	$3{,}5 \cdot 10^6$	41			216
4	2	1,6	$3{,}0 \cdot 10^6$	38	manueller Reset & begrenzt funktional testbar (Funktionen)	$Q_v \cong Q_w \cong Q_n \leq 1 \cdot 10^{-6}$	228
5		1,5	$2{,}5 \cdot 10^6$	35			240
6	3	1,4	$2{,}0 \cdot 10^6$	32	automatisiert & begrenzt funktional testbar (Versuchsbeding.)	$Q_v \cong Q_w \cong Q_n \leq 5 \cdot 10^{-7}$	252
7		1,3	$1{,}5 \cdot 10^6$	29			264
8	4	1,2	$1{,}0 \cdot 10^6$	26	automatisiert & voll funktional testbar	$Q_v \cong Q_w \cong Q_n \leq 2{,}5 \cdot 10^{-7}$	276
9		1,1	$0{,}5 \cdot 10^6$	23			288
10		1	0	≤ 20			300

Wertskala		Eigenschaftsgrößen					
Nutz-wert	VDI 2225	Aufwand zur mechanischen Integration	Aufwand zur Steuerung und Leistungs-elektronik	Wartungs-aufwand	Herstellkosten	Entwicklungs-risiko	Bauteilkom-plexität
Pkt.	Pkt.	[-]	[-]	[-]	[€]	[-]	[-]
0	0	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch	3.500	sehr hoch	sehr hoch
1					3.300		
2	1	hoch	hoch	hoch	3.100	hoch	hoch
3					2.900		
4	2	mittel	mittel	mittel	2.700	mittel	mittel
5					2.500		
6	3	gering	gering	gering	2.300	gering	gering
7					2.100		
8	4	sehr gering	sehr gering	sehr gering	1.900	sehr gering	sehr gering
9					1.700		
10					1.500		

Tabelle A.2: Urteilsschema zu den irreversiblen Linearkupplungen

A.3 Auslegung der Wabenstruktur

Bei der Auslegung der Wabenstruktur wird die maximale kinetische Energie W_{max} der Hülsenkombination kurz vor dem Stauchen als gegebene Größe vorausgesetzt. Mit dem festgelegten Längenänderungslimit Δx_{limit} lässt sich mit Gleichung (9.1) die konstante Stauchkraft $F_{WS,konst}$ der Wabenstruktur berechnen.

$$F_{WS,konst} = W_{max} / \Delta x_{limit} \tag{9.1}$$

Das Verhältnis Stauchkraft zur Querschnittsfläche der Wabenstruktur ergibt nach Gleichung (9.2) die Druckfestigkeit σ_{WS}, mit der sich eine passende Wabenstruktur auswählen lässt.

$$\sigma_{WS} = F_{WS,konst} / A_{WS} \tag{9.2}$$

Bei den pyrotechnisch betätigten Linearkupplungen kommen Wabenstrukturen mit der Druckfestigkeit von ca. 1200 psi zum Einsatz.

A.4 Auslegung der Druckkammerwand

Die minimale Wandstärke s_{min} der Druckkammer lässt sich mittels der Kesselformel nach Gleichung (9.3) ermitteln. Gegebene Größen sind der maximale Druck p_{max}, der mittlere Durchmesser d_m und die zulässige Spannung des Werkstoffs.

$$s_{DK,min} = p_{DK,max} \cdot d_{DK,m} /(2 \cdot \sigma_{DK,zul}) \tag{9.3}$$

Für die pyrotechnisch betätigten Linearkupplungen beträgt die minimale Wandstärke 1,9 mm.

Lebenslauf

Alexander Naubert

geb. am 24.11.1981 in Kempten (Allgäu)

Staatsangehörigkeit: deutsch

Ausbildung:

Schulausbildung:	09/98 – 07/99	Westport Central School, Westport
		Abschluss: High-School Abschluss
	09/92 – 07/02	Allgäu-Gymnasium, Kempten
		Abschluss: Allgemeine Hochschulreife
Zivildienst:	09/02 – 06/03	Schullandheim St. Franziskus, Balderschwang
Studium:	10/03 – 09/08	Studium Maschinenwesen, Technische Universität München
		Abschluss: Diplom-Ingenieur

Berufserfahrung:

09/08 – 04/10	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Angewandte Mechanik (AMM), Technische Universität München
05/10 – 04/13	Doktorand, EADS Deutschland GmbH
05/13 – 04/16	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD), Universität Stuttgart
06/16 – jetzt	Entwicklungsingenieur bei der Nanotec Electronic GmbH & Co. KG im Bereich Motoren und Mechanik

ISBN-13: 978-3-946924-04-3