

INHALTSVERZEICHNIS

0.	Einleitende Bemerkungen.....	1
Teil 1		
Magnet-Spanntechnik Grundlagen-Modellbildung-Anwendung in der Zerspanenden Fertigung		
1.	<u>Allgemeines:</u>	4
1.1	Zielvorgabe und Motivation.....	4
1.2	Zusammenfassung / Abstract.....	6
1.3	Verzeichnis der Kurzzeichen und Indizes.....	9
2.	<u>Zur wissenschaftlichen, technischen Entwicklung des Magnetismus</u>	22
2.1	Quellen.....	27
3.	<u>Stand der Technik</u>	30
3.1	Fachliteratur zur Modellbildung von Neu- und Entmagnetisierungs-Kurven.....	30
3.2	Fachliteratur zur Berechnung von MES's (Magnetic Equivalent Circuit's.....	31
3.3	Fachliteratur zur Modellbildung von magnetischen Spannsystemen.....	32
3.4	Fachliteratur zur Auslegung von Magnet-Spannplatten.....	33
3.5	Fachliteratur zur Modellbildung der Anwendung von magnetischen Spannsystemen in der zerspanenden Fertigung.....	33
3.6	Fachliteratur zur InSitu-Überwachung von magnetischen Spannsystemen.....	33
3.7	Zusammenfassung zum Stand der Technik, der zur Verfügung stehenden Literatur und daraus ableitbare Aufgabenstellung.....	34
3.8	Quellen.....	36
4.	<u>Verwendete Grundgleichungen und grundlegende Zusammenhänge</u>	39
4.1	Die makroskopischen Maxwell-Gleichungen.....	39
4.2	Gleichungen zur Berechnung von magnetischer Netzwerken.....	40
4.3	Magnetische Dipole.....	40
4.4	Magnetismus als Elektrodynamik der Kontinua und Materialgleichungen.....	41
4.5	Energie des Magnetfeldes und spezifische magnetische Haftkraft.....	42
4.6	Die thermische Energie.....	44

4.7	Magnetischer Leitwert und Flussdichteverteilung.....	44
4.8	Drehmoment und potentielle Energie eines magn. Dipols im äußeren Magnetfeld.....	44
4.9	Das magnetische Feld von leitungsgebundenen Strömen.....	45
4.10	Der Hall-Effekt.....	47
4.11	Analogie der Vektorfelder.....	48
4.12	Quellen.....	49
5.	Grundlagen der Physik des Magnetismus.....	51
5.1	Magnetismus in Materie - deduktive Behandlung des Magnetismus als Ursache.....	51
5.1.1	Atomare magnetische Momente.....	51
5.1.2	Diamagnetismus.....	55
5.1.3	Paramagnetismus.....	56
5.1.4	Ferromagnetismus.....	60
5.1.5	Weitere Arten von Magnetismus.....	65
5.2	Thermodynamische Grundlagen und die Potentiale des Mikromagnetismus.....	66
5.2.1	Das Gibbsche Potential – Freie Enthalpie.....	66
5.2.2	Magnetostriktion.....	67
5.2.3	Isotrope Potentiale.....	68
5.2.3.1	Das magnetostatische Potential.....	68
5.2.3.2	Das magnetische Streufeld-Potential (Formanisotropie).....	69
5.2.3.3	Die Austauschenergie.....	69
5.2.4	Anisotrope Potentiale.....	70
5.2.4.1	Die Kristallenergie.....	70
5.2.4.2	Das elastische bzw. magnetoelastische Potential (Spannungsanisotropie).....	71
5.2.5	Das magnetische Gesamtpotential als Variationsaufgabe.....	72
5.3	Mikromagnetismus - induktive Behandlung des Magnetismus als Erscheinung.....	73
5.3.1	Domänenwände und Bereichsstruktur.....	73
5.3.2	Die Magnetisierungskurve.....	76
5.3.2.1	Beschreibung, Verlauf und Kenngrößen.....	76
5.3.2.2	Drehprozesse.....	78
5.3.2.3	Bloch-Wand-Wölbungen und Verschiebungen sowie der Rayleigh-Bereich.....	80
5.3.2.4	Der Paraprozess und Einmündung in die magnetische Sättigung.....	82
5.3.3	Vorgänge bei Feldabbau und Gegenfeldern, Koerzitivfeldstärke und Hysterese.....	83
5.4	Abhängigkeit der Kennwerte von Temperatur, Härte bzw. Festigkeit, Werkstoff-Zusammensetzung und Bearbeitung – was bleibt für die Praxis.....	85
5.4.1	Die Sättigungsfeldstärke.....	85
5.4.2	Die Sättigungspolarisation.....	87
5.4.3	Die Anfangspermeabilität.....	89
5.4.4	Die maximale differentielle Permeabilität (in progress).....	91
5.5	Quellen.....	92

6.	<u>Grundlagen der Magnet-Spanntechnik</u>	97
6.1	Einflüssen auf die magnetische Haftkraft und max. mögliche Haftkräfte	97
6.2	Magnetische Spanngeräte	98
6.2.1	Permanent-Magnet-Spannplatten	98
6.2.2	Elektro-Magnet-Spannplatten	99
6.2.3	Elektro-Permanent-Magnet-Spannplatten, single system	100
6.2.4	Elektro-Permanent-Magnet-Spannplatten, double system	100
6.3	Eigenschaften unterschiedlicher Spannprinzipien	101
6.3.1	Eigenschaften Magnetik	101
6.3.2	Eigenschaften Vakuumtechnik	101
6.3.3	Eigenschaften Hydraulik / Mechanik	102
6.3.4	Eigenschaften Pneumatik	102
6.3.5	Eigenschaften Elektrik	102
6.4	Werkstoffe	103
6.4.1	Unmagnetische Werkstoffe	104
6.4.2	Weichmagnetische Werkstoffe	105
6.4.3	Hartmagnetische Werkstoffe	106
6.5	Haftkräfte und Verschiebekräfte – Einfluss der Reibung	110
6.6	Haftkraft und Werkstückdicke	111
6.7	Haftkraft und Luftspalt	111
6.8	Haftkraft und Legierung	112
6.9	Haftkraft und Wärmebehandlung	113
6.10	Haftkraft und Top Tooling	114
6.11	Entmagnetisierung	117
6.12	Unfall- und Gesundheitsschutz bei magnetischen Spannmitteln und Feldern	121
6.13	Quellen	123
7.	<u>SAV-Magnet-Systeme, Übersicht – Bauarten – Einsatzmöglichkeiten</u>	125
7.1	Permanent-Magnet-Spannplatten und -Rundmagnete	125
7.1.1	SAV 220.30 / 243.01 / 243.01 / 244.01 – 4 mm Sekundär-Polteilung	125
7.1.2	SAV 220.31 / 242.05 / 243.10 / 244.07 – 6 mm echte Parallel-Polteilung	128
7.1.3	SAV 220.32 / 243.11 / 244.11 – 15 mm echte Polteilung	129
7.1.4	SAV 244.06 – Radial-Polteilung	130
7.2	Elektro-Magnet-Spannplatten und -Rundmagnete	131
7.2.1	SAV 243.40 / 243.41 / 244.43 – 4 mm Sekundär-Polteilung	131
7.2.2	SAV 243.42 – 13 / 18 / 25 mm echte Parallel-Polteilung	133
7.2.3	SAV 244.40 – Radial-Polteilung	134
7.2.4	SAV 244.41 – 5,5 / 9 / 18 mm Ring-Polteilung	135
7.2.5	SAV 244.45 – Topf-Magnetsysteme zum Gleitschuh-Schleifen	136

7.3	Elektro-Permanent-Magnet-Spannplatten und -Rundmagnete	139
7.3.1	SAV 243.70 – 13 / 18 / 25 mm echte Parallel-Polteilung	139
7.3.2	SAV 243.73 / 243.71 / 244.73 – 4 mm Sekundär-Polteilung	140
7.3.3	SAV 243.72 – magnetisch aktive Anschläge	141
7.3.4	SAV 243.76 – 35 / 65 / 85 mm echte Parallel-Polteilung	142
7.3.5	SAV 243.77 – 27,5 / 55 / 85 mm echte Parallel-Polteilung	143
7.3.6	SAV 243.78 – Rund-Polteilung	144
7.3.7	SAV 243.79 – Hexagonal-Polteilung	145
7.3.8	SAV 243.80 – Quadrat-Polteilung	146
7.3.9	SAV 244.70 / 244.71 – Radial-Polteilung	147
7.3.10	SAV 244.72 – 5,5 / 9 / 18 mm Ring-Polteilung	149
7.3.11	SAV 244.74 – 28,5 mm echte Parallel-Polteilung	150
7.4	Sonder-Magnetsysteme	151
7.4.1	Elektro-Magnete für extreme Spanabnahme bei großen Luftspalten	151
7.4.2	Elektro-Permanent-Magnete zum Präzisionsschleifen von 2 Lagen Linearführungen	152
7.4.3	Elektro-Permanent-Magnete mit Polumschaltbarkeit	154
7.4.4	Elektro-Permanent-Magnete Mini-Rails und Linearführung höchster Genauigkeit	155
7.5	Klassifizierung der Magnet-Systeme und Haftkraft-Potentialabschätzung	156
7.5.1	Für Permanent-Magnet-Spannplatten	156
7.5.2	Für Elektro-Magnetspannplatten	157
7.5.3	Für Elektro-Permanent-Magnetspannplatten	157
7.6	Quellen	159
8.	Berechnung und Modellierung der Quellen des magnetischen Feldes	160
8.1	Modellierung von Neu-Kurven	160
8.1.1	Modifiziertes Wendetangentenverfahren für Neu-Kurven	162
8.1.1.1	Überlegungen zur Ableitung aus der Quantenphysik sowie der Langevin-Funktion	169
8.1.1.2	Näherung für kleine Feldstärken	172
8.1.1.3	Näherung für große Feldstärken im Bereich der Sättigung	173
8.1.1.4	Gesamt-Modell der Neu-Kurve	175
8.1.2	Gedanken zu einem alternativen Hysterese-Modell	179
8.1.3	Parametrierung einzelner Neu-Kurven	179
8.1.3.1	Neu-Kurve für 1.0037 (St37, S235JR) als Funktion $B = f(H)$	183
8.1.3.2	Neu-Kurve für 1.0037 (St37, S235JR) als Funktion $H = f(B)$	184
8.1.3.3	Neu-Kurve für AlNiCo (LNG42)	185
8.1.3.4	weitere Neu-Kurven für weiche Stähle / Guss / Nickel und Kobalt	186
8.1.3.5	Neu-Kurven für gehärtete Stähle (in progress)	188
8.2	Modellierung von Entmagnetisierungs-Kurven	180
8.2.1	Entmagnetisierungskurven für Neodym-Magnete (N42)	190
8.2.2	Entmagnetisierungskurven für AlNiCo-Magnete (LNG42)	191
8.2.3	Weitere Entmagnetisierungskurven für AlNiCo-Magnet	192
8.3	Die Spule als Quelle des magnetischen Feldes - Feldstärkeverteilung	193
8.3.1	In Ringspulen im Ringzentrum	194
8.3.2	In Rechteckspulen	201
8.3.3	In Segmentspulen	207
8.3.4	In Ringspulen-Paaren am spezifischen Durchmesser (in progress)	212
8.4	Quellen	214

9.	Modellbildung von Magnetsystemen	215
9.1	Flussröhrenmodell von Magnet-Spannplatten - magnetic equivalent circuits (MEC) - Grundlagen der Modellbildung	215
9.2	Flussverhältnisse und magnetische Leitwerte der Modellbereiche	216
9.2.1	Flussverhältnisse im Pol-Spalt von Spannmagneten.....	216
9.2.1.1	Messung der Flussdichte an Magnet SAV 243.77-55.....	216
9.2.1.2	Flussröhrenmodell für einen unbelegten Magnet.....	218
9.2.2.2.1	Magnetischer Leitwert und Flussdichteverteilung ohne Werkstück im Haupt-Pol-Spalt (Nutzfluss).....	218
9.2.2.2.2	Magnetischer Leitwert und Flussdichteverteilung ohne Werkstück Bereich II aus Pol-Kante (Nutz- oder Streufluss).....	221
9.2.2.2.3	Magnetischer Leitwert im Bereich III (Fluss im Stahlpol).....	221
9.2.2.2.4	Magnetischer Leitwert und Flussdichteverteilung ohne Werkstück im Pol-Spalt (Streufluss) Bereich IV.....	222
9.2.2.2.5	Magnetischer Leitwert und Flussdichteverteilung ohne Werkstück am Magnetkern (Streufluss) Bereich V.....	222
9.2.2.3	Flussröhrenmodell für einen belegten Magnet.....	223
9.2.2.3.1	Magnetischer Leitwert und Flussdichteverteilung im Werkstück mit ausreichenden Dicken.....	223
9.2.2.3.2	Magnetischer Leitwert und Flussdichteverteilung für dünne Werkstücke.....	226
9.2.3	Definition von Grenzluftspalten.....	230
9.2.3.1	Grenzluftspalt bei Annäherung eines niedrig legierten Stahl-Werkstücks an die äußere Feldlinie.....	230
9.2.3.2	Abschätzung der Feld-Höhe für SAV-Magnetsysteme bei unterschiedlichen Werkstückmaterialien.....	231
9.2.3.3	Grenzluftspalt, bei dessen Überschreitung der Streufluss nicht ins Werkstück geht	232
9.2.4	Überlegungen zum Konzentrationseffekt bei Teilbelegung.....	233
9.3	Modellberechnungen für einzelne Magnetsysteme	235
9.3.1	Modellierung von nicht schaltbaren Permanent-Magneten.....	235
9.3.2	Modellierung von schaltbaren Permanent-Magneten (in progress).....	242
9.3.3	Modellierung von Elektro-Magneten.....	243
9.3.4	Modellierung von Elektro-Permanent-Magneten, single system (in progress).....	246
9.3.5	Modellierung von Elektro-Permanent-Magneten, double system (in progress).....	247
9.4	Variantenbetrachtungen zu den Modellbildungen – Güte vs. Kostenoptimierung	248
9.4.1	Variantenbetrachtungen bei nicht schaltbaren Permanent-Magneten (Polteilung vs. Feld-Höhe und rel. Energiedichte).....	248
9.4.2	Variantenbetrachtungen bei schaltbaren Permanent-Magneten (ND- Qualität vs. Nennhaftkraft und Kosten) (in progress).....	251
9.4.3	Variantenbetrachtungen bei Elektro-Magneten (Luftspaltverhalten vs. Erwärmung).....	252
9.4.4	Variantenbetrachtungen bei Elektro-Permanent-Magneten single system (AlNiCo-Qualität und Volumen vs. Luftspaltverhalten und Kosten) (in progress).....	254
9.4.5	Variantenbetrachtungen bei Elektro-Permanent-Magneten double system (ND- Qualität und Volumen vs. Luftspaltverhalten und Kosten) (in progress).....	255
9.5	Quellen	256

10.	<u>Auslegung von SAV-Magnetsystemen</u>	287
10.1.	Auslegung der Spulen für SAV-Magnet-Spannplatten	257
10.1.1	Grundlegende Betrachtungen	257
10.1.2	Festlegung der minimalen Durchflutung für SAV-Elektro- und Elektro-Permanent Magnetspannplatten	259
10.1.3	Füllfaktoren einer Spulenwicklung	260
10.1.4	Grundgleichung der Spulenauslegung	263
10.1.5	Minimaler Drahtdurchmesser für rechteckige Spulen	265
10.1.6	Minimaler Drahtdurchmesser für trapezförmige Spulen	265
10.1.7	Minimaler Drahtdurchmesser für runde Spulen	265
10.1.8	Widerstände, Leistung und Stromaufnahme der Magnet-Spannplatten	266
10.2	Thermische Auslegung von Elektro- und Elektro-Permanent-Magneten	267
10.2.1	Idealisierte Berechnung der Erwärmung ohne thermische Änderung der Leistungsaufnahme	268
10.2.2	Berechnung der Erwärmung mit thermischer Änderung der Leistungsaufnahme	269
10.2.3	Minimiertes Wickelvolumen nach Auslegung Wickeldraht und Erwärmung	273
10.2.4	Magnetsysteme mit Wasserkühlung	276
10.3	minimale Impulsdauer der Magnetisierung (in progress)	280
10.3.1	Induktivität des Spannsystems	280
10.3.2	minimale Impulsdauer	280
10.4	Geometrische Auslegung (in progress)	280
10.4.1	Auslegung von Permanent-Magneten	280
10.4.1.2	Magnetische Auslegung	280
10.4.1.3	Mechanische Auslegung Schaltmechanismus	280
10.4.1.4	Mechanische Auslegung auf Drehzahl	280
10.4.2	Auslegung von Elektro- und Elektro-Permanent-Magneten	280
10.4.2	Magnetische Auslegung	280
10.4.3	Mechanische Auslegung auf Drehzahl und Tischbefestigung	280
10.5	Quellen	281
11.	<u>Anwendungsspezifische Simulationssoftware SAV MagSim</u>	282
11.1	Beschreibung und Überblick	282
11.2	Haftkraftermittlung	283
11.2.1	Statistische Auswertung der SAV-Magnet-Spannplatten	285
11.2.1.1	Permanent-Magnet-Spannplatten und -Rundmagnete	285
11.2.1.2	Elektro-Magnet-Spannplatten und -Rundmagnete	286
11.2.1.3	Elektro-Permanent-Magnet-Spannplatten und -Rundmagnete	287
11.2.2	Einfluss der Werkstück-Legierung	289
11.2.3	Einfluss der Werkstück-Wärmebehandlung	289
11.2.4	Modellierung des Luftspaltverhaltens und der Arbeitsfähigkeit der SAV-Magnete	290
11.2.5	Einfluss der Werkstückdicke	291
11.2.6	Einfluss des Belegungsgrades	292
11.2.7	Einfluss Top-Tooling Polschuhe	293
11.2.8	Einfluss Top-Tooling Auflage-Polplatten	293

11.3	MagSim rectangular / Planzug auf Magnet-Spannplatten	294
11.3.1	Werkstückverformung aufgrund freiwerdender Eigenspannungen.....	295
11.3.2	Rückbiegung der Werkstückverformung aufgrund Eigengewicht.....	296
11.3.3	Gemittelte spez. Nennhaftkraft bei Verformung durch Eigenspannungen.....	296
11.3.4	Planziehen von Werkstücken bzw. Rückbiegung mit Magnet-Spannplatten.....	300
11.4	MagSim rectangular / Belastungskollektiv	306
11.4.1	Zerspanungskräfte beim Plan- und Umfangsfräsen.....	306
11.4.2	Zerspanungskräfte beim Planschleifen.....	311
11.5	MagSim rectangular / übertragbare Kräfte	313
11.6	MagSim rectangular / Auswertungen und Beispiele	316
11.6.1	Überschlagsermittlung der mittleren Zerspanungskraft und Zerspanungsleistung.....	316
11.6.2	Berechnungsbeispiele zum Planzug.....	318
11.6.3	Berechnungsbeispiele zum Planfräsen.....	319
11.6.4	Berechnungsbeispiele zum Planschleifen.....	320
11.7	MagSim circular / Einfluss unterschiedlichen Werkstückdurchmesser auf die Haftkraft bei Rundmagneten	321
11.7.1	Einfluss der Werkstückdicke bei unterschiedlichen Werkstückdurchmessern für Rundmagnete mit Radial-Polteilung.....	322
11.7.2	Einfluss des Messinganteils der Radial- und Ring-Polteilung bei unterschiedlichen Werkstückdurchmessern.....	323
11.8	MagSim circular / Belastungskollektiv	324
11.8.1	Zerspanungskräfte beim Plan- und Runddrehen.....	324
11.8.2	Zerspanungskräfte beim Rundscheifen.....	330
11.8.3	Zerspanungskräfte beim Bohren.....	331
11.8.4	Gewichts- und Fliehkräfte.....	333
11.9	MagSim circular / übertragbare Kräfte beim Drehen	334
11.9.1	Übertragbare Kräfte aufgrund Werkstückabriss bei Ringen oder vollen Scheiben.....	334
11.9.2	Übertragbare Kräfte aufgrund beginn lokaler Verformung dünner Ringe.....	336
11.10	MagSim circular / übertragbare Kräfte beim Rundscheifen	339
11.11	MagSim circular / Verformungen durch Bearbeitungskräfte	340
11.11.1	Verformungen in axialer Richtung.....	341
11.11.2	Verformungen in radialer Richtung.....	342
11.12	MagSim rectangular / Auswertungen und Beispiele	345
11.12.1	Erforderliche spez. Haftkräfte beim Hartdrehen im Vergleich zum Weichdrehen bei Werkstück-Abriss.....	345
11.12.2	Lokale Verformung vs. Werkstückabriss bei dünnen Ringen.....	345
11.12.3	Hartdrehen vs. Rundscheifen bei Beginn lokaler Verformung.....	346
11.12.4	Überschlagsermittlung beim Weich- und Hartdrehen gegen Werkstück-Abriss.....	347
11.12.5	Berechnungsbeispiele zur Werkstückverformung.....	349

11.13	Datensammlung MagSim	350
11.13.1	Materialdaten	350
11.13.2	Empfohlene Zerspanungsparameter	352
11.14	Quellen	353
12.	<u>Mess- und Kalibriersysteme mit smart magnetic field sensors (Projekt Felxisens)</u>	354
12.1	Funktions- und Projektbeschreibung	354
12.2	Sensor-Array zur Messung der Flussdichteverteilung zwischen Werkstück und Polplatte	356
12.3	Sensor-Array zur Messung der Flussdichte zwischen Polplatte und Magnetmaterial	357
12.4	In Verbindung mit dem Teilprojekt intelligente Steuerung	357
12.5	Möglichkeiten der Auswertung (in progress)	358
12.6	Quellen	359
13.	<u>Ausblick Inprozess-Messtechnik und -Optimierung – Industrie 4.0</u>	364
13.1	Beschreibung	364
13.2	Einsatzmöglichkeiten für SAV	364
13.3	Vorteile	364
13.4	Messtechnik und Versuchsaufbau (in progress)	364
13.5	Ergebnisse (in progress)	364
13.6	Quellen	364
14.	<u>Zusammenfassung der Ergebnisse</u> (in progress)	365
14.1	Magnetische Grundlagen	365
14.2	Modellbildung	365
14.3	Magnetauslegung	365
14.4	Anwendungsspezifische Simulation	365
14.5	Entwicklungen zur magnetischen Messtechnik	365
14.6	In-Prozess-Messtechnik und -Optimierung	365

15.	Anhang	366
15.1	Kennwerte und Tabellen	366
15.2	Verzeichnis der Richtlinien, Normen und Vorschriften	383
15.3	Ergebnisse der SQUID-Suszeptometer-Messungen	384
15.4	Ableitungen und Integrale	385
15.5	Verzeichnis der Auslegungsprogramme	400
15.6	Statistische Auswertung der Prüfprotokolle	401
15.7	Stichwortverzeichnis	409

Teil 2

Kraftbetätigte und magnetische SpannhalterEine Gegenüberstellung am Beispiel der
Drehbearbeitung dünnwandiger Ringe

1.	<u>Gedanken zum Erkenntnisgewinn (anstatt eines Vorworts)</u>	411
2.	<u>Verzeichnis der Kurzzeichen und Indizes</u>	415
3.	<u>Einleitende Bemerkungen</u>	422
4.	<u>Zielvorgabe</u>	424
5.	<u>Abstract</u>	425
6.	<u>Spannversuche zum statischen und thermischen Verhalten</u>	426
6.1	<u>Versuchsaufbauten</u>	426
6.1.1	Zur axialen Nachgiebigkeit infolge der simulierten Bearbeitungskräfte	426
6.1.2	Zur Messung der maximal übertragbaren Zerspanungskräfte	427
6.1.3	Zur thermischen Verformung eines Elektro-Rundmagnets	428
6.2	<u>Durchführung der Versuche</u>	429
6.2.1	Zur axialen Nachgiebigkeit infolge der simulierten Bearbeitungskräfte	429
6.2.2	Zur Messung der maximal übertragbaren Zerspanungskräfte	429
6.2.3	Zur thermischen Verformung eines Elektro-Rundmagnets	429
6.3	<u>Versuchsergebnisse zur Simulation der Kraftspannhalter</u>	430
6.3.1	Zur axialen Nachgiebigkeit infolge der simulierten Bearbeitungskräfte	430
6.3.2	Zur Messung der maximal übertragbaren Zerspanungskräfte	433
6.4	<u>Versuchsergebnisse zur Simulation der Rundmagnete</u>	435
6.4.1	Haftkraftmessung und Messung der max. übertragbaren Zerspanungskräfte	435
6.4.2	Messung der thermischen Verformung eines Elektro-Rundmagnets	437
6.5	<u>Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse aus den Spannversuchen zum statischen und thermischen Verhalten</u>	441

7.	<u>Analytische Überlegungen zur Beurteilung des stat. Verhaltens</u>	442
7.1	Kraftbetätigte Futter	442
7.1.1	Axiale statische Nachgiebigkeit	443
7.1.2	Radiale statische Nachgiebigkeit	457
7.1.3	Erforderliche Spannkraften aufgrund von Bauteilgeometrie und Zerspanungskraften bei radialer Spannung	460
7.1.4	Berechnung der vom Futter aufgebracht Spannkraften	465
7.2	Rundmagnete - Erforderliche Haftkraften aufgrund von Schnittkraften, der Unwucht und Werkstück-Geometrien	467
8.	<u>Gegenüberstellung und Beurteilung der Spannkonzepete</u>	488
8.1	Qualitätskriterium Arbeitsgenauigkeit	490
8.1.1	Thermische Verformung	490
8.1.2	Statische Nachgiebigkeit	491
8.1.3	Dynamische Nachgiebigkeit	493
8.1.4	Antriebsdynamik und Arbeitsgenauigkeit	495
8.2	Qualitätskriterium Leistungsvermögen	498
8.2.1	Übertragbare Kraften und statische Nachgiebigkeit	498
8.2.2	Antriebsdynamik und Leistungsvermögen	501
8.3	Qualitätskriterium Umweltverhalten	503
8.3.1	Ergonomie und Design	503
8.3.2	Unfallschutz	507
8.4	Qualitätskriterium Zuverlässigkeit	509
8.4.1	Wartungsaufwand und Instandsetzung	509
8.4.2	Spanabfuhr	511
8.5	Qualitätskriterium Wirtschaftlichkeit	512
8.4.1	Anschaffungskosten	512
8.4.2	Rüst-, Spann-, Bearbeitungszeiten und Flexibilität des Spannmittels	514
8.4.3	Vorrichtungsstundensätze und Stückkosten nach VDI-Richtlinie 3258	517
9.	<u>Zusammenfassung der Ergebnisse</u>	521
10.	<u>Anhang</u>	525
11.	<u>Literaturverzeichnis</u>	536