



NORTH-WEST UNIVERSITY
YUNIBESITHI YA BOKONE-BOPHIRIMA
NOORDWES-UNIVERSITEIT
POTCHEFSTROOMKAMPUS

WETENSKAPLIKE BYDRAES
REEKS H: INTREEREDE NR. 222

AKTIEWE MAGNETIESE LAERS

Prof George van Schoor

Intreerede gehou op 5 September 2008

Die Universiteit is nie vir menings in die publikasie aanspreeklik nie.

Navrae in verband met *Wetenskaplike Bydraes* moet gerig word aan:

Die Kampusregistrator
Noordwes-Universiteit
Potchefstroomkampus
Privaatsak X6001
POTCHEFSTROOM
2520

Kopiereg © 2008 NWU

ISBN 978-1-86822-563-7

AKTIEWE MAGNETIESE LAERS

G. van Schoor

Skool vir Elektriese, Elektroniese en Rekenaaringenieurswese, Noordwes Universiteit, Potchefstroom Kampus, Privaatsak X6001, Potchefstroom, 2520, Suid Afrika

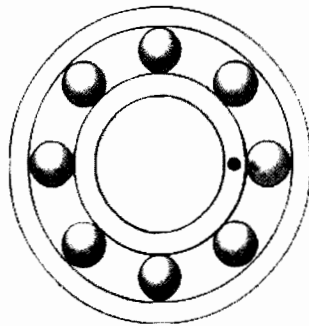
Opsomming: Die manuskrip gee 'n oorsig van die navorsing van die outeur aan die Noordwes Universiteit oor die onderwerp van aktiewe magnetiese laers (AMLs). Die hoofvordeel van AMLs word uitgelig as betroubaarheid vanweë die eliminering van smeringstelsels. Die teorie van AMLs word oorsigtelik toegelig aan die hand van 'n massa-demper-veer ekwivalent. AMLs word as 'n samevoeging van Meganiese Ingenieurswese, Elektroniese Ingenieurswese en Rekenaarwetenskap beskryf en geklassifiseer as 'n produk van Megatronika. AMLs word gesten as 'n stueletegnologie vir die korrelbedreaktor wat in ontwikkeling is in Suid Afrika. Die AML navorsingsaktiwiteit vir die periode 2003 tot 2008 is gekenmerk deur die ontwikkeling van verskeie demonstrasiemodelle en die progressie van basiese AML modelle met beperkte grade van vryheid tot en met 'n gevorderde model met vyf grade van vryheid stelsel word bespreek. Vanweë die sterk assosiasie met die vakgebied van megatronika is 'n navorsingsgroep met die naam *McTronX* in 2004 gestig. Die groep doen navorsingsprojekte in oorleg met die industrie met permanente personeel. Die projekte dien as voertuig vir die opleiding van PhD en Meestersgraad studente. Kundigheid is gevestig in AML simulering, ontwerp en vervaardiging, rotordinamika met AML ondersteuning, kragversterkers en PMSM aandrywing. Toekomstige fokus sluit in stelselintegrering en vangleiers.

Stelwoorde: aktiewe magnetiese laers, navorsing, geskiedenis.

1. INLEIDING

Die doel van die manuskrip is om 'n oorsig te verskaf van die outeur se navorsing in aktiewe magnetiese laers [AMLs]. Die manuskrip dek oorsigtelik 'n motivering vir die navorsing, die teorie van AMLs en die geskiedenis van die outeur se navorsing. Ter afsluiting word 'n toekomstig geskets soos van toepassing ten tye van die skryf van die manuskrip.

'n Laer word gedefinieer as 'n toestel wat beperkte relatiewe beweging toelaat tussen twee dele; tipies roterende of lineêre beweging [1]. Die mees bekende laer is sekerlik die koeëllaer soos getoon in figuur 1.



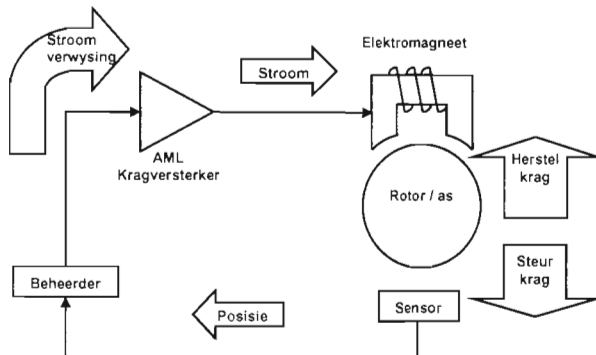
Figuur 1: Illustrasie van konvensionele koeëllaer [2]

In 'n magnetiese laer word magnetiese krag gebruik om beperkte relatiewe beweging tussen twee dele toe te laat. Figuur 2 toon die tipiese voorkoms van 'n magnetiese laer met 'n ferromagnetiese rotor en 'n stator met elektrisgeleidende spoel.



Figuur 2. Tipiese magneetlaer [3]

In 'n AML word die magnetiese kragte aktief beheer om beperkte relatiewe beweging te bewerkstellig. Die basiese werking van 'n AML word in figuur 3 geïllustreer. Die rotor of as verteenwoordig die massa wat gesuspenseer moet word. Indien 'n steurkrag op die rotor uitgeoefen word, sal 'n posisiesensor die versteuring in posisie waarneem. Die afwyking in posisie vanaf die verlangde posisie verteenwoordig 'n fout wat deur die beheerder omgeskakel word in stroomverwysing vir die kragversterker. Die kragversterker voorsien dan weer die verlangde stroom aan die elektromagneet wat op sy beurt 'n herstellkrag op die rotor uitoefen om die rotor terug te beweeg na die verlangde posisie.



Figuur 3. Tipiese AML werking

Aktiewe magnetiese laers bied die volgende voordele: [4]

- Geen wrywing – As gevolg van die geen wrywing eienskap het AMLs tipies 'n ordegruote laer verliese as oliefilm laers
- Geen smeringstelsel – Dit maak AMLs geskik vir toepassings waar olie nie gebruik mag word nie soos vakuumpompe, turbines, kernreaktore en sentrifuges.
- Lang leeftyd
- Lae gewig as gevolg van die eliminasie van smeringstelsels
- Verlaagde brandrisiko, ook as gevolg van die afwesigheid van smeringstelsels
- Vibrasiebeheer
- Diagnostiese vermoëns

Die nadele van AMLs sluit in:

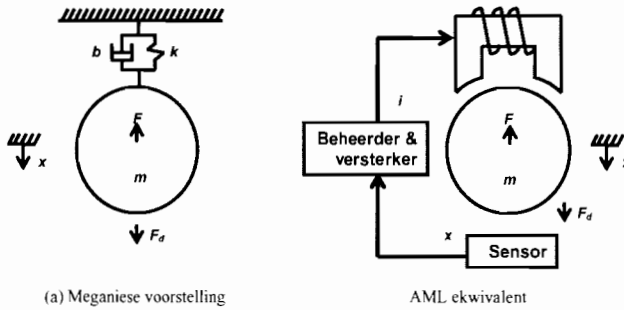
- Laer laskapasiteit
- Groter laer
- Hoër koste

2. AKTIEWE MAGNETIESE LAER TEORIE

Die werking van 'n AML is ekwivalent aan 'n massa-demper-veer stelsel. Figuur 4 illustreer die ekwivalensie. Die herstellkrag wat die massa-demper-veer uitoeven vir 'n posisiesteuring kan beskryf word deur (1).

$$F = kx + b\dot{x} \quad (1)$$

k verteenwoordig die styfheid en b die demping van die meganiese stelsel. Beide hierdie parameters is elektronies verstelbaar met die AML.



Figuur 4. Massa-demper-veer ekwivalensie

Die differensiaalvergelyking vir die kragbalans op die massa word gegee deur (2).

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = F_d \quad (2)$$

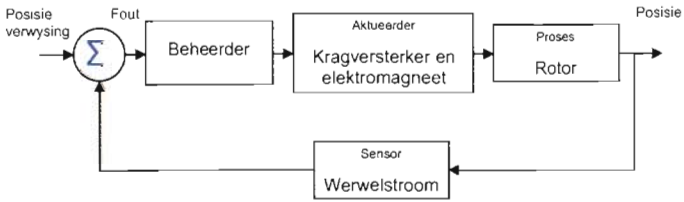
Die Laplace transformasie van (2) lewer (3):

$$ms^2X + bsX + kX = F_d \quad (3)$$

Die oordragsfunksie van steurkrag na posisie word gegee deur (4).

$$\frac{X}{F_d} = \frac{1}{ms^2 + bs + k} \quad (4)$$

Die oordragsfunksie van die AML word nou bepaal om die ekwivalensie met (4) te identifiseer. Figuur 5 toon 'n blokdiagram vir die AML stelsel met die hoof boublokke van die stelsel.

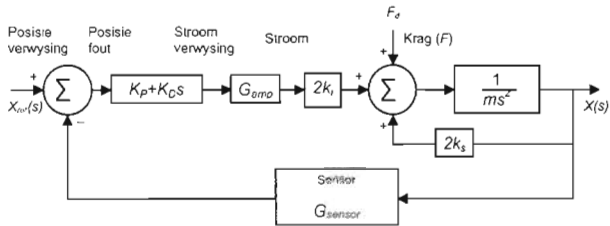


Figuur 5. Blokdigram van AML stelsel

Die aktueerder oordragsverband is hoogs nie-lineêr soos gegee in (5)

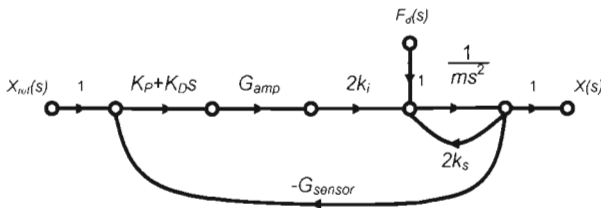
$$F = K_m \frac{i_m^2}{(g_0 + x)^2} \quad (5)$$

met K_m 'n magnetiese konstante, i_m die elektromagneetstroom en g_0 die nominale luggaping. Met die uitbreiding van die AML stelsel na 2 aktueerders wat mekaar opponeer en die linearisering van die kragvergeliking om 'n werkpunt vir stroom en luggaping, word die gelineariseerde blokdigram soos in figuur 6 getoon, verkry [5]. Die beheerder is 'n standaard PD beheerder en die konstantes k_i en k_s verteenwoordig lineariseringskonstantes vir stroom en posisie onderskeidelik. k_i en k_s is 'n funksie van die aktueerderreïenskappe asook die stroom- en posisiewerkpunt.



Figuur 6. Gelineariseerde voorstelling van die AML stelsel

Die seinvloeiagramvoorstelling van die blokdigram in figuur 6 word in figuur 7 getoon.



Figuur 7. Seinvloeiagramvoorstelling van gelineariseerde AML stelsel

Die toepassing van Mason se reël om die oordragsfunksie van die stelsel vanaf stuurkrag F_d na posisie te verkry, lewer die resultaat in (6).

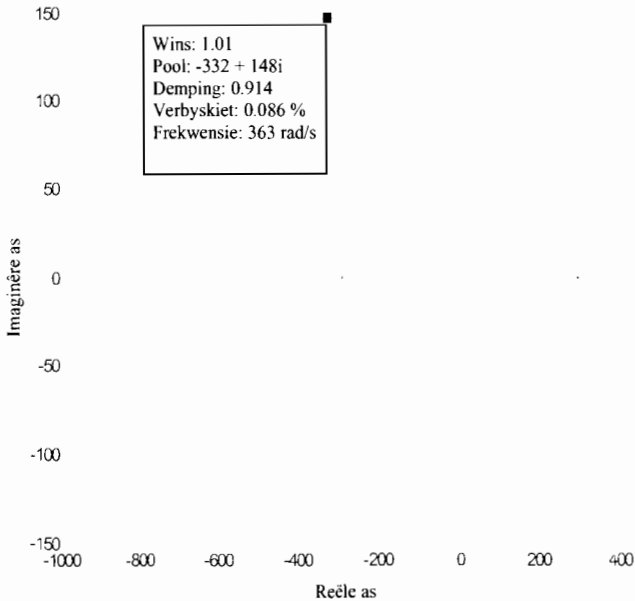
$$T(s) = \frac{X}{F_d} = \frac{1}{ms^2 + 2K_D k_i s + (2K_P k_i - 2k_c)} \quad (6)$$

As (6) met (4) vergelyk word, dan is die ekwivalente styfheid en demping soos volg:

$$k_{eq} = 2K_P k_i - 2k_c \quad (7)$$

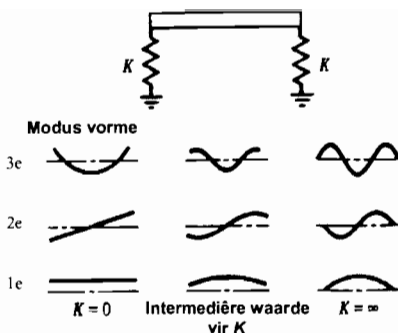
$$b_{eq} = 2K_D k_i \quad (7)$$

Die AML lewer dus styfheid en dempingseienskappe wat verstelbaar is. Die wortellokus van die AML stelsel in figuur 8 toon die poolposisies van die geslotelusstelsel vir spesifieke styfheid en dempingskonstantes. Die aanvangspoolposisies toon duidelik dat die opelus stelsel 'n onstabiele pool het. Met die spesifieke keuse van PD konstantes word die AML gestabiliseer om goed gedempte gedrag te toon.



Figuur 8. Wortellokus van geïntegreerde AML stelsel

Die model vir die rotor is gekies as 'n eenvoudige massa. Die rotor is egter 'n baie meer komplekse model in die werklikheid. Die rotor kan elasties en ook girokopies wees en in die ekstreme geval is die gedrag van die rotor nader aan dié van 'n kitaarsnaar wat staan en rezoneer afhangende van die snelheid waarteen die rotor roteer. Figuur 9 toon die tipiese modusvorme van die rotor en hoe die styfheid van die laers die modusvorme kan beïnvloed. 'n Baie meer komplekse model van die rotor word dus benodig vir praktiese stelsels wat die stelsel eintlik 'n meer veranderlike stelsel maak wat meer veranderlike beheer kan vereis.



Figuur 9. Modusvorme van die elastiese rotor [6]

AMLs is 'n samevoeging van Meganiese Ingenieurswese, Elektroniese Ingenieurswese en Rekenaarwetenskap. Die velde van Meganiese Ingenieurswese sluit in Sterkte-analise, Rotordinamika, Vibrasie-analise en Termiese analises. Die Elektriese Ingenieurswese velde wat ingesluit word is Sensors, Elektromagnetika, Drywingselektronika, Beheerstelsels en Mikroverwerkers. Die velde van Rekenaarwetenskap wat ingesluit word is Rekenaarsimulasies, Ingebedde beheer en Kondisiemonitering. AMLs kan dus geklassifiseer word as 'n produk van Megatronika.

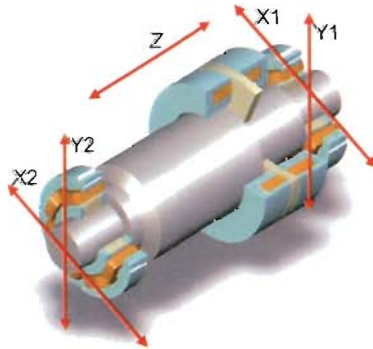
3. GESKIEDENIS VAN AML NAVORSING AAN DIE NOORDWES UNIVERSITEIT

AMLs is gesien as 'n sleuteltegnologie vir die korrelbedreaktor wat in ontwikkeling is in Suid Afrika. Die toepassings sluit in turbines en kompressors in die hoof siklus asook hoë spoed waaiers vir bystandstelsels. Toepassings vir die breër enjiesektor sluit in enjiesstoer in hoë spoed vliegtuie asook waaiers vir die opkomende waterstofmark.

Die navorsing in AMLs is begin om die plaaslike industrie te ondersteun in terme van die bestuur van die tegnologie. Dit sluit in die spesifikasie van die tegnologie as deel van stelsels, die inbedryfstelling van die tegnologie, asook die instandhouding van die tegnologie.

Die AML navorsingsaktiwiteite vir die periode 2003 tot 2008 is gekenmerk deur die ontwikkeling van verskeie demonstrasiemodelle om die kundigheid in AML stelsels te vestig. Figuur 10 toon 'n tipiese 5 grade van vryheid AML stelsel soos in die praktyk aangetref word met twee radiale laers wat onderskeidelik grade van vryheid in die $X1$, $Y1$ en $X2$, $Y2$ rigtings gee asook 'n aksiale laer wat 'n grade van vryheid in die aksiale rigting gee. Die progressie van basiese AML modelle met beperkte grade van vryheid tot en met 'n vyf grade van vryheid stelsel word bespreek.

In 2003 word die eerste meestersgraadstudente ingeskryf en die taak opgelê om basiese AML modelle te ontwikkel. Die eerste modelle wat ontwikkel word is 'n basiese aksiale laer opstelling asook 'n basiese radiale laer opstelling. Figuur 11 toon die hardware opstelling soos ontwikkel vir die aksiale laer. Tabel 1 som die spesifikasies op vir die opstelling en tabel 2 som die tegnologiese progressie op. Die rotor het 'n massa van 2 kg, gesuspenseer op 'n luggaping van 3 mm. Die maksimum krag wat die laer kan uitoefen is 250 N. Die stelsel het slegs een grade van vryheid naamlik in die aksiale rigting, maak gebruik van inhuus-ontwikkelde prototipe lineêre kragversterkers asook inhuus-ontwikkelde induktiewe sensors. Die beheerder wat gebruik is, is 'n persoonlike rekenaar gebaseerde dSPACE prototiperingsstelsel.



Figuur 10: Illustrasie van 'n 5 grade van vryheid AML stelsel



Figuur 11: Aksiale AML

Tabel 1 Aksiale AML spesifikasies

Parameter	Waarde
Massa	2 kg
Luggaping	3 mm
Maksimum krag	250 N

Tabel 2 Tegnologiese progressie

Parameter	Waarde
Aantal vryheidsgrade	1
Kragversterker	Lineêr
Sensor	Induktief
Beheerder	dSPACE

Die eerste radiale laer opstelling wat ontwikkel is, sien soos in Figuur 12 getoon daaruit. Dit bestaan uit 'n enkel homopolêre radiale magneetlaer aan die een kant en 'n konvensionele rolemementlaer aan die ander kant. Tabel 3 som die spesifikasies op vir die opstelling en tabel 4 som die tegnologiese progressie op. Die as het 'n massa van 2 kg, gesuspenseer op 'n luggaping van 1 mm. Die maksimum krag wat die laer kan uitoefen is 100 N. Die stelsel het twee grade van vryheid en wêl in die twee radiale rigtings van die laer. Die stelsel maak ook gebruik van inhuis-ontwikkelde prototipe lineêre kragversterkers en inhuis-ontwikkelde induktiewe sensore. Die beheerder is ook persoonlike rekenaar gebaseerde dSPACE prototiperingstelsel.



Figuur 12: Enkel radiale homopolêre AML

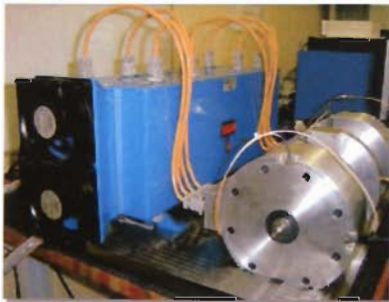
Tabel 3 Enkel radiale AML spesifikasies

Parameter	Waarde
Massa van as	7 kg
Luggaping	1 mm
Maksimum krag	100 N

Tabel 4 Tegnologiese progressie

Parameter	Waarde
Aantal vryheidsgrade	2
Konfigurasie	Homopolêr
Kragversterker	Lineêr
Sensor	Induktief
Beheerder	dSPACE

In 2004 word 'n dubbel radiale heteropolêre opstelling aangepak. Dit sien daaruit soos in figuur 13 getoon. Die stelsel bestaan uit twee heteropolêre radiale laers wat die stelsel vier vryheidsgrade gee; twee in elke radiale laer. Tabel 5 som die spesifikasies op vir die opstelling in tabel 6 som die tegnologiese progressie op. Die stelsel word ontwerp om beide 'n buigbare en 'n rigiede rotor te akkommodeer soos getoon in figuur 14. Die buigbare as het 'n massa van 7.7 kg en is ontwerp vir 'n spoed van 10,000 r/min waarteen dit deur die eerste buigmodus beweeg het. Die rigiede as het 'n massa van 14 kg en is ontwerp vir 'n snelheid van 30,000 r/min waarteen dit onder die eerste buigmodus loop. Die asse word op 'n luggaping van 0.6 mm gesuspendeer. Die maksimum krag wat die laërs kan uitoefen is 500 N. Die stelsel maak gebruik van inhuis-ontwikkelde 3 kVA skakelmodus kragversterkers en uitgekoopte werwelstroom posisiesensors. Die beheerder is ook 'n persoonlike rekenaar gebaseerde dSPACE prototipingsstelsel.



Figuur 13: Dubbel radiale heteropolêre AML

Tabel 5 Dubbel radiale AML stelsel spesifikasies

Parameter	Waarde
Massa van buigbare as	7.7 kg
Massa van rigiede as	14 kg
Luggaping	0.6 mm
Maksimum krag	500 N

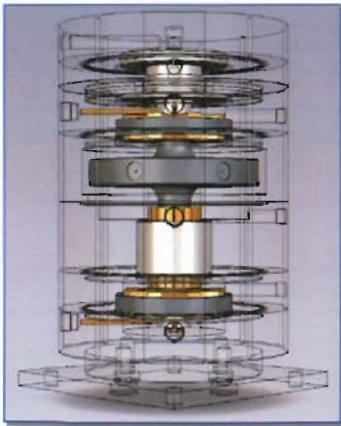


Figuur 14: Buigbare en rigiede rotors

Tabel 6 Tegnologiese progressie van dubbelradiale AML stelsel

Parameter	Waarde
Aantal vryheidsgrade	4
Konfigurasie	Heteropolêr
Kragversterker	Skakelmodus
Sensor	Wewelstroom
Beheerder	dSPACE

In 2006 word 'n ten volle gesuspendeerde vliegwielstelsel aangepak. Dit sien daaruit soos in figuur 15 getoon. Die stelsel bestaan uit twee heteropolêre radiale laers en een aksiale laer wat die stelsel in al vyf vryheidsgrade suspenseer. Tabel 7 som die spesifikasies op vir die opstelling en tabel 8 som die tegnologiese progressie op. Die stelsel suspenseer 'n 18 kg vliegwielrotor op 'n luggaping van 0.5 mm. Die maksimum kragte wat die laers kan uitoeien is 150 N radiaal en 520 N aksiaal. Die stelsel huisves ook 'n inhuus-ontwikkelde 2 kW permanente magneet sinchrone masjien (PMSM) wat die rotor opspinn tot 30,000 r/min . Uitgekoopte skakelmodus kragversterkers en uitgekoopte wewelstroom posisiesensore word in die stelsel gebruik. Die beheerder is in hierdie geval 'n alleenstaande dSPACE prototiperingstelsel. Die implementering van die beheer op 'n enkelbordrekenaar bring die vlak van implementering een stap nader aan 'n industriële stelsel.



Figuur 15: Vliegwielstelsel

Tabel 7 Vliegwiel spesifikasies

Parameter	Waarde
Massa van rotor	18 kg
Luggaping	0.5 mm
Maksimum kragte:	
Radiaal	150 N
Aksiaal	520 N

Tabel 8 Tegnologiese progressie

Parameter	Waarde
Aantal vryheidsgrade	5
Konfigurasie	Heteropolêr
Kragversterker	Skakelmodus
Sensor	Wewelstroom
Beheerder	Alleenstaande dSPACE

Vanweë die sterk assosiasie met die vakgebied van megatronika is 'n navorsingsgroep met die naam *McTronX* in 2004 gestig. Sedert 2004 het die groep 'n laboratorium begin opbou wat vandag goed toegerus daar uitsien. Dit is moontlik gemaak met strategiese befondsing deur die universiteit asook goeie THRIP befondsing. Die *McTronX* groep hou ook 'n interne konferensie in September 2005 as meganisme om intern sowel as na buite die werksaamhede bekend te stel.

Die navorsingsmodel waarop die groep funksioneer word in figuur 16 uitgebeeld. Die groep definieer projekte in ooreenstemming met industriële vennote waarna die projekte dan uitgevoer word deur projekspanne wat saamgestel is uit personeel binne die skole vir Elektiese, Meganiese en Kemingenieurswese asook industriële vennote wat permanent in die groep werk.

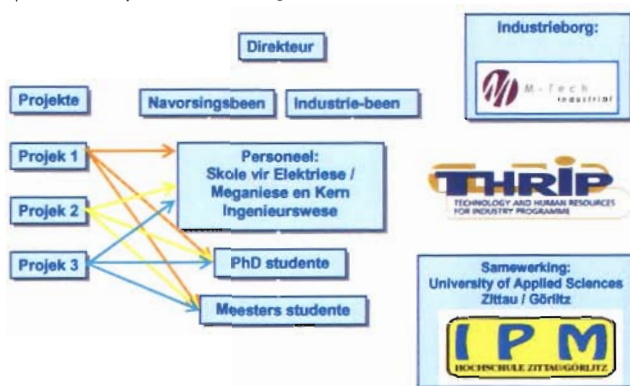
Die projekte dien ook as platform vir die opleiding van PhD en M studente. Sommige projekte het meer 'n suiwer navorsingsaanslag en ander weer 'n meer industriële aanslag. Die navorsingsprojekte fokus op die volgende vraagstukke:

- Kondisiemonitering
- Selfwaarneming
- Vanglaers
- AML stelselmodellering en beheer

Die industriële projekte fokus op die volgende areas:

- Industriële beheer: (Versoenbaarheid, betroubaarheid)
- Robuuste beheer: (Buigbare rotor)
- Vanglaers: (Veilige faling)

Die hoof finansiële borgskap is deur die M – Tech Industrial THRIP program. *McTronX* het ook 'n internasionale samewerkingssvennoot in die die Universiteit van Toegepaste Wetenskappe Zittau / Görlitz in Duitsland. Die uitruil van studente en personeel is al op hierdie ooreenkomste gefasiliteer.



Figuur 16: *McTronX* navorsingsmodel

Die kundigheid gevestig in die groep kan as volg gekategoriseer word:

- AML simulatie, ontwerp en vervaardiging
- Stelselbeheer
- Rotordinamika met AML ondersteuning
- Stelsel ontwerpproses
- Kragversterkers en PMSM aandrywing

Die aantal M en PhD studente afgelewer binne die *McTronX* program staan op 26 en 4 onderskeidelik aan die einde van 2008. Die aantal publikasies aan die einde van 2008 staan op 4 joernalpublikasies en 6 konferensieaanbiedinge. Die hoof internasionale konferensies op magneetlaers is die *International Symposium on Magnetic Suspension Technology (ISMST)* asook die *International Symposium on Magnetic Bearings (ISMB)*. Die *McTronX* navorsingsgroep woon die konferensies by sedert 2005 en het reeds goeie internasionale bande opgebou.

4. TOEKOMSTIGE FOKUS

Die toekomstige fokus van die navorsing kan as volg gekategoriseer word:

- Hoë spoed rotor stelselmodellering
- Vanglaer modellering / spesifikasie

- Selfwaarneming robuustheid / praktiese implementering
- Meerveranderlike stelselbeheer

Die industriële fokus wat as voertuig vir die navorsing dien sal wees op hoë spoed AML gesuspenderde aandryfstelsels. Spesifieke vraagstukke sluit in:

- Stelselintegrasie / Industriële beheer
- Vanglaerspesifikasie
- PMSM ontwerpverifikasie

5. VERWYSINGS

- [1] <http://www.thefreedictionary.com/bearing>
- [2] <http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:BallBearing.gif>
- [3] <http://www.skf.com>
- [4] P. Allaire, C.R. Knospe, *et al.*, "Short course on magnetic bearings." Alexandria, Virginia, United States of America: University of Virginia, 1997.
- [5] E.O. Ranft, "The Development of a Flexible Rotor Active Magnetic Bearing System," Master's thesis, The School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, North-West University, May 2005.
- [6] John M. Vance, *Rotordynamics of Turbomachinery*, WILEY, New York, pp. 116-170, 1988.