Brückner Maschinenbau Siegsdorf

Sensorlose Regelung für eine elektronisch gesteuerte Folienreckmaschine

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az 18168 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Günter Oedl, Brückner Maschinenbau, Siegsdorf

Dezember 2004

11/95

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Az	18168	Referat	21/0	Fördersumme	775.500,00 DM

Antragstitel	**Sensorlose Regelung für eine elektronisch gesteuerte Folienreckmaschine**
Stichworte	Energie, Kunststoff, Motor

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
30 Monate	**09/01**	**02/04**	

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger	Brückner Maschinenbau GmbH Königsbergerstraße 5-7 83313 Siegsdorf	Tel. (8 86 62) 63-0 Fax (0 86 62) 63-307 Projektleitung Herr Bamberger Bearbeiter

Kooperationspartner

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Folienreckanlagen vom Typ LISIM zeichnen sich durch eine extreme Flexibilität der Prozessführung aus. Diese hohe Flexibilität wird durch einen Linearmotor erreicht, welcher wie alle Direktantriebe einen geringen Wirkungsgrad hat. Weiter verschlechtert wird der Wirkungsgrad durch das Fehlen eines Positionssignals, das sich durch die hohe Umgebungstemperatur von bis zu 300 °C verbietet. Dadurch ist nur ein sog. gesteuerter oder nicht geregelter Betrieb möglich.
Ziel ist eine Reduktion des elektrischen Energieverbrauches um ca. 50%.
Dies wird durch eine sensorlose Positionsregelung erreicht, d.h. die Position der einzelnen Kluppen wird durch genaue Auswertung der Motorströme und Motorspannungen ermittelt. Mit dieser Information wird der eingeprägte Strom zu 100% als Wirkstrom eingesetzt. Somit wird dieselbe Wirkleistung mit weniger Strom erreicht. Die Kupferverluste im Motor, die den größten Verlustanteil ausmachen, sinken überproportional wegen der quadratischen Abhängigkeit vom Strom (P=R*I^2).
Energiereduktion bei einer Anlage von 440 kW auf 250 kW = -188 KW, dies ergibt bei typischen 7500 Produktionsstunden/Jahr eine Einsparung von 1.4 Mio kWh /Jahr und Anlage.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Anforderungsprofil für benötigte Hardware und Software
Simulation der elektrischen Größen im Linearmotor
Protoyp Regler und Inbetriebnahme
Untersuchung und Bewertung Positionsschätzung Vergleich mit Linearmesssystem
Entwurf Regelverfahren stationärer Betrieb
Entwurf und Regelverfahren Eintreten und Austreten der Kluppe aus einer Zone
Spezifikation und Auswahl der Serienhardware
Umrüsten des Teststandes bei Brückner (57 Antriebe)
Verifikation Gesamtsystem Teststand
Umrüsten Laboranlage
Test Laboranlage

Ergebnisse und Diskussion

Die sensorlose Regelung wurde implementiert und getestet

Die Abweichung zwischen gemessener und geschätzter Position ist maximal 2 mm.
Die Reduktion der Verluste beträgt 66 %.
Damit werden pro Anlage 1.6 Mio kWh pro Jahr reduziert.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Fazit

Deutsche Bundesstiftung Umwelt ○ An der Bornau 2 ○ 49090 Osnabrück ○ Tel 0541/9633-0 ○ Fax 0541/9633-190

1. Projektkennblatt

2. Inhaltsverzeichnis

1. Projektkennblatt 4
2. Inhaltsverzeichnis 4
3. Verzeichnis von Bildern 4
4. Begriffsverzeichnis und Symbolverzeichnis 4
5. Zusammenfassung 5
6. Einleitung 5
7. Hauptteil 7
7.1. Linearmotorbetriebenen Reckanlage 7
7.2. Sensorlose Regelung 10
7.3. Modell des Motors 10
7.4. Positionsschätzung 13
7.5. Parameteradaption 15
7.6. Entwicklungstufe Systemkonzept 17
7.7. Versuche am rotierenden Motors. 17
7.8. Auswahl des Antriebsreglers 17
7.9. Versuche am Linearmotorteststand. 18
8. Fazit 21
9. Literaturverzeichnis 23

3. Verzeichnis von Bildern

Abbildung 1 : Systemübersicht LISIM® 7
Abbildung 2 : Schienenrtäger mit Linermotoren 7
Abbildung 3: Geschwindigkeitsprofile LISIM® 8
Abbildung 4: Kraftentwicklung gesteuert 9
Abbildung 5: Fluss über Position in Phasendarstellung 11
Abbildung 6: Fluss über Position in Statorkoordinaten 12
Abbildung 7: Fluss als Ortskurve. 13
Abbildung 8: Flussschätzung 14
Abbildung 9: Positionsschätzung 14
Abbildung 10: Parameteradaption 15
Abbildung 11: 10 Umrichter mit je 3 Achsen (30 Achsen) 18
Abbildung 12: Linermotorteststand 19
Abbildung 13: Detail des Linearmotorteststandes mit Lasertriangulation. 20
Abbildung 14: Positionsschätzung am Linearmotorteststand. 21
Abbildung 15: Strom bei Steuerung und Regelung 22
Abbildung 16: Energieeinsparung bei einer Anlage 23

4. Begriffsverzeichnis und Symbolverzeichnis

IS	Statorstrom
LS	Statorinduktivität
RS	Statorwiderstand
PP	Polyprolylen
PET	Polyethyleneterephthalate
PA	Polyamid
PLA	Poly Lactic Acid
PLL	Phase Lock Loop
U	Statorspannung
ΨS	Flussverkettung der Kluppe in der Statorzone
PSI_alpha_ref	Referenzfluss in Achse Alpha
PSI_beta_ref	Referenzfluss in Achse Beta

5. Zusammenfassung

Linearmotorbetriebene Reckanlagen hatten bisher einen geringen Wirkungsgrad, da sie mit konstanten Strom betrieben wurden. Wegen fehlender Information der aktuellen Kraft an der Kluppe, mussten der Strom auf des Belastungsmaximum eingestellt werden. Da andererseits die Verluste direkt vom Strom abhängen, führt die zu großen elektrischen Verlusten.
Die durchgeführte Entwicklung ermöglicht eine genaue Schätzung der aktuellen Position und Kraft der Kluppe und stellt somit für jede Kluppe den benötigten Strom ein.
Dadurch sinken die Verluste drastisch, im untersuchten Fall um 66 %, was für eine Produktionsanlage eine jährliche Einsparung von 1.5 Mio kWh bedeutet.

Weiters wird durch die höhere Produktionsstabilität Ausschuss während der Produktion vermieden.

Dieses System wird bei einer in Konstruktion befindliche Anlage umgesetzt, die Mitte 2006 in Betrieb geht.

Weiters wird mit den Betreibern bestehender Anlage über eine Umrüstung auf das neuen System verhandelt.

6. Einleitung

Brückner Maschinenbau konstruiert und vertreibt Folienreckanlagen.

Dünne Kunststofffolien werden auf sogenannten biaxialen Reckanlagen produziert. Dabei wird der Rohstoff, wie PP, PET, PA oder PLA, der in Form von Granulat angeliefert wird, in einem Extruder aufgeschmolzen und auf eine Kühlwalze abgegossen. Diese Primärfolie mit einer Dicke von z.B. 1 mm wird durch den eigentlichen Reckprozeß veredelt.
Die Folie wird in zwei Richtungen (=biaxial), also in Folienlaufrichtung und quer dazu verstreckt. Bei PP betragen die Streckraten z.B. 5x8, d.h. die Folie wird in Längsrichtung um den Faktor 5 und in Querrichtung um den Faktor 8 verstreckt.In obigen Beispiel stellt sich in der Endfolie eine Dicke von 25 µm ein (1000µm/5/8=25µm). Die größten Folienanlagen heute haben eine Folienbreite von 10 m bei einer Geschwindigkeit von 500 m/min (= 8,3 m/s) und einem Ausstoß von 6000 kg/h. Die so erzeugten Folien werden als BOPP (biaxial oriented PP), BOPET, BOPA etc. bezeichnet und für Verpackungszwecke, vorwiegend im Lebensmittelbereich, als Klebebänder, Kondensatorfolie, Farbträger in Druckern, Folien für Flachbildschirme etc. verwendet. Typische Dicken sind 10µm bis 30 µm, für Spezialfolien sind im Bereich 0,5 µm bis 200 µm erhältlich.

Der größte Teil der Folienreckanlagen, die sequentiellen Anlagen, verstrecken die Folie in zwei Arbeitprozesse, zuerst längs über mehrere Walzen, deren Geschwindigkeit gegen Ende der Maschine zunimmt und dann in der Querreckung, bei der der Folienrand in sogenannten Kluppen festgeklemmt wird. Die Kluppen laufen auf einer Schiene, deren Abstand sich vergrößert.
Seit 1998 sind mehrer Anlagen nach dem LISIM® Prinzip, „**li**nearmotorbetriebene **Sim**ultanreckanlage“, in Betrieb. Hierbei werden die beiden Reckvorgänge simultan durchgeführt. Die Kluppen sind als Sekundärteile eines Linearmotors ausgeführt und

werden einzeln gesteuert. So kann während der Querreckung, die durch die Schienengeometrie definiert wird, elektronisch die Geschwindigkeit erhöht werden, wodurch sich automatisch der Längsabstand zwischen den Kluppen vergrößert. Eine typische Länge des LISIM Teiles ist 65 m, bei 7m Folienbreite am Auslauf bei einer Geschwindigkeit von 400 m/min am Auslauf.

Die Qualität der Folie wird durch viele Eigenschaften beschrieben, deren wichtigsten die Foliendicke, die Reißfestigkeit, der Elastitizitätsmodul, und einige optische Eigenschaften sowie die Gleichmäßigkeit dieser Größen sind. Linearmotorbetriebene Anlagen produzieren Folien höhere Güte. Bei vielen Anwendungen kann eine LISIM® Folie geringer Dicke dieselben Anforderungen erfüllen, wie eine sequentielle Folie größerer Dicke. Dadurch zeichnet sich eine LISIM® Folie durch sparsamen Rohmaterialeinsatz aus.

Ein Nachteil der LISIM® Anlagen war bisher die große Verlustleistung in den Linearmotoren, die durch den gesteuerten Betrieb entstanden. Der gesteuerte Betrieb zeichnet sich dadurch aus, dass die Linearmotoren mit einem konstanten Strom betrieben werden. Die Größe des Stroms wird durch den maximalen Betriebsfall definiert. So wird im Mittel der Motor mit einem zu großen Strom betrieben. Die Verluste eines elektrischen Motors werden hauptsächlich durch die Größe des Stromes verursacht, da die ohmschen Verluste dominant sind. Somit stellt ein gesteuerter Betrieb energetisch einen ungünstigen Zustand dar, da im überwiegenden Anteil des Betriebs ein zu hoher Strom und somit unnötig hohe Verluste anfallen.
Wesentlich günstiger ist einem geregelten Betrieb, wobei nur der augenblicklich notwendige Strom eingesetzt wird. Das heißt der Antriebsregler muss in jedem Zeitpunkt wissen, ob viel oder wenig Strom notwendig ist. Wird der Strom zu klein eingestellt, so verliert die Kluppe an Geschwindigkeit, und der Reckprozess erfolgt nicht oder nur ungenügend. Ist der Strom zu groß eingestellt, so erfolgt der Reckprozess zwar richtig, aber es fallen zusätzliche unnötige Verluste an.
Zur Anpassung des Stromes an das Optimum muss der Antriebsregler, also die Elektronik, die den Strom in den Motor einstellt, den Lastzustand kennen. Dies könnte dadurch erreicht werden, dass die Position der aller bewegten Kluppe andauernd gemessen werden und der Strom gerade soweit reduziert wird, bis alle Kluppen gerade noch an der gewünschten Position sind. Ein solcher Betrieb wird regelungstechnisch „Positionsregelung“ genannt. Eine dynamische, also zeitnahe, und genaue Messung der Position von ca. 800 Kluppen in einem bis zu 300 °C heißen Ofen stellt aber eine heute unlösbare Aufgabe dar: Auf einer Gesamtlänge von 120 m müssen 700 angetriebene Kluppen mindestens 100 Mal pro Sekunde mit einem Fehler kleiner als 3 mm erfasst werden.

Verfahren die einen geregelten Betrieb ermöglichen, aber ohne Positionssensoren auskommen, werden „sensorlose Regelung“ genannt. Die Entwicklung umfasst den Entwurf, die Implementierung und die Messungen mit dieses Systems.

7. Hauptteil

7.1. Linearmotorbetriebenen Reckanlage

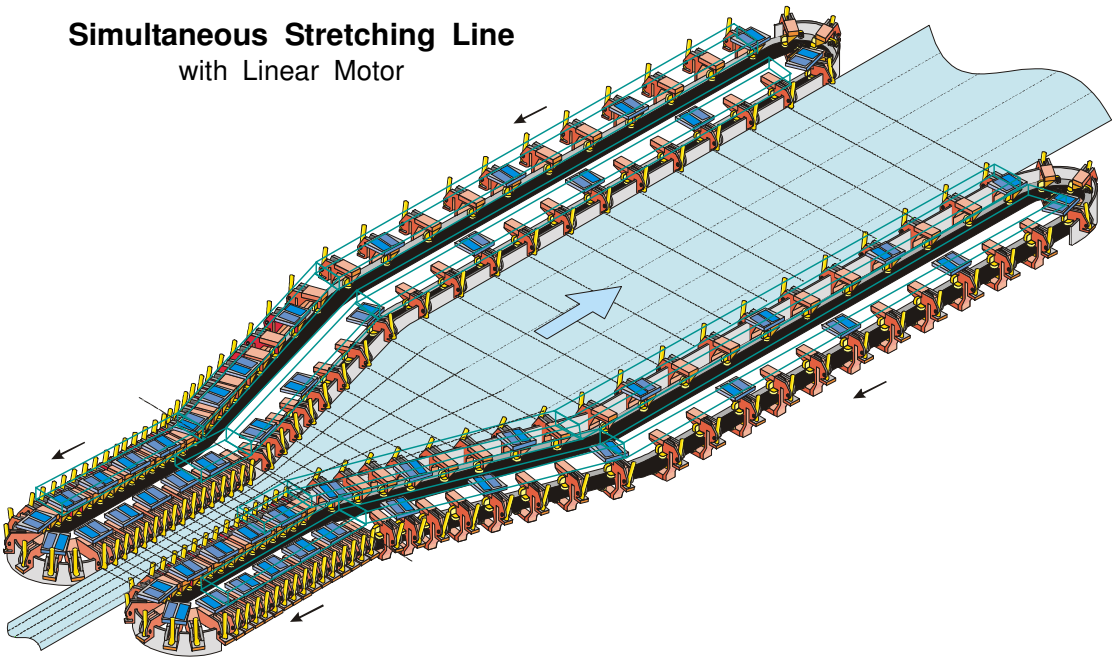


Abbildung 1 : Systemübersicht LISIM®

Vom Gesamtprozess wird hier nur der Teil der simultanen Streckung beschrieben. Die anderen Produktionsschritte, wie Extrusion, Gießwalze, Abzug und Wickler sind z.B. in [Sca99] nachzulesen.
Der Reckrahmen besteht aus zwei symmetrischen Schienen, auf denen bis zu 2000 Folienkluppen laufen.

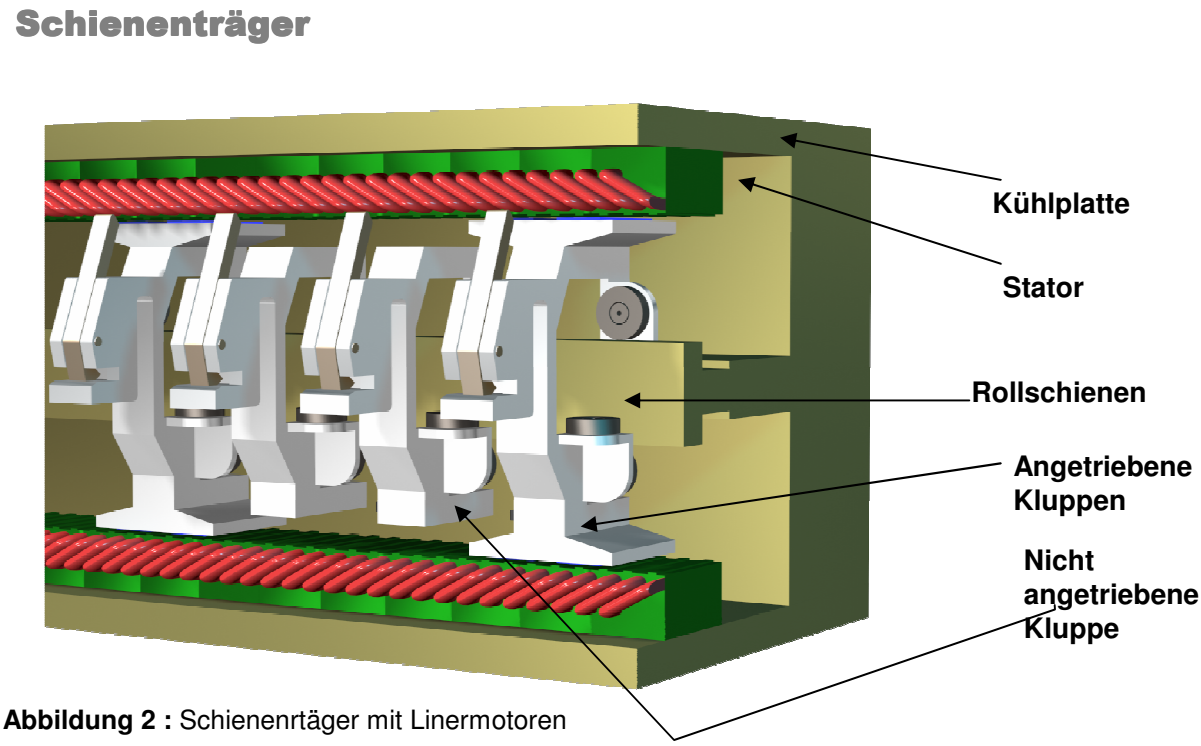


Abbildung 2 : Schienenrtäger mit Linermotoren

Jede Kluppe wird durch 8 Laufrollen auf der Lausschiene geführt. Typischerweise trägt jede dritte Kluppe Magnetbalkone, über die die Längskraft durch den Stator des Linearmotor aufgebracht. wird. Über und unter den Magnetbalkonen befinden sich die Statoren, das sind die Wicklungen des Linearmotors. Die Wicklungen sind entlang der Schiene in so viele Zonen unterteilt, dass im Normalfall in jeder Zone maximal eine Kluppe ist.
Technologisch erlaubt eine solche LISIM® Anlage eine wesentliche größere Flexibilität der Reckprozesses, was sich außerordentlich positiv auf die Folieneigenschaften auswirkt: höhere Festigkeit, höheres Elastizitätsmodul, extrem gute Beeinflussung des Rückschrumpfes, freie Einstellbarkeit der Längs- und Quereigenschaften sowie der Laufsicherheit auswirkt [Sca99],[Cam99].

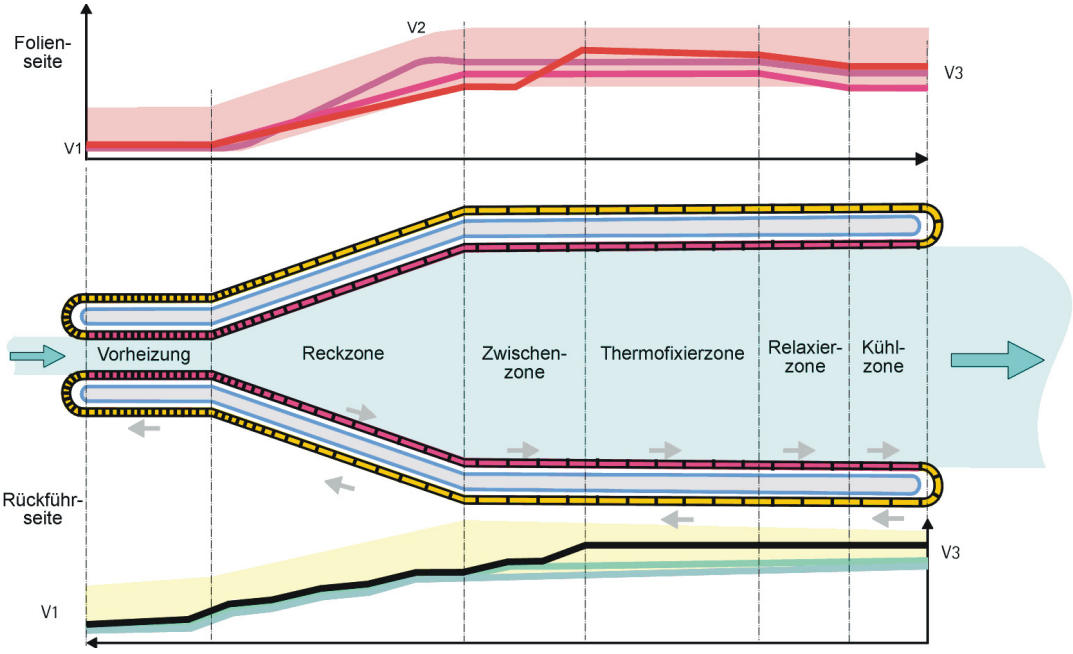


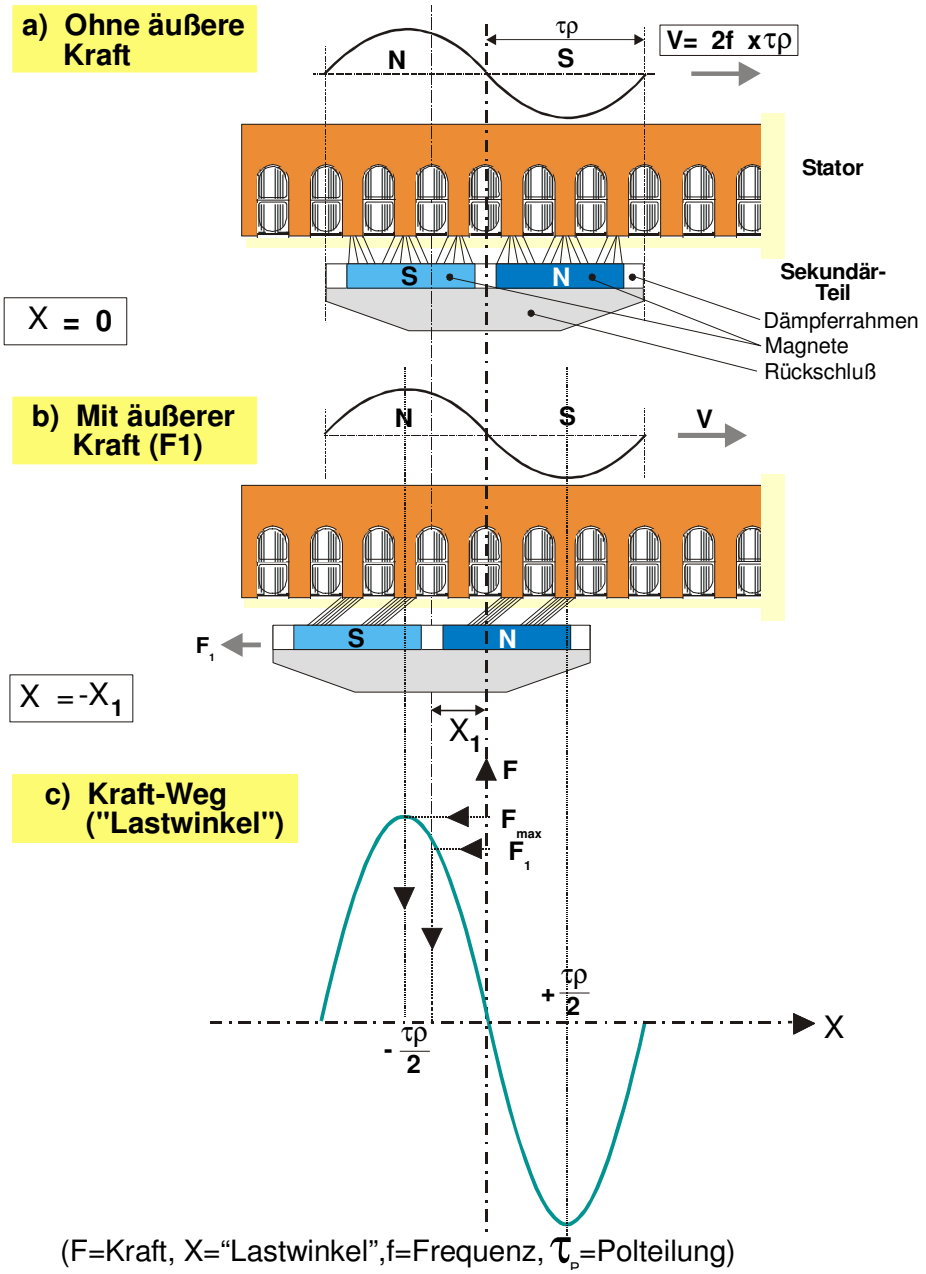
Abbildung 3: Geschwindigkeitsprofile LISIM®

Entscheidend für die hohe Flexibilität der Längsreckung ist die einzelne Beeinflussung jeder Kluppe entlang der Bahn. Während die Führung entlang einer Schiene die Querreckung festlegt, wird die Längsreckung nur durch das Geschwindigkeitsprofil entlang der Schiene definiert. Nach Gleichung (1) ist das lokale Reckverhältnis ausschließlich durch die Geschwindigkeit bestimmt:

$$d(x) = \frac{v(x)}{v1} * d_1 \qquad (1),$$

wobei x die Position in Folienlaufrichtung, v(x) die lokale Geschwindigkeit, v_1 die Geschwindigkeit im Einlauf und d_1 der Kluppenabstand am Einlauf ist. Um jede Kluppe getrennt beeinflussen zu können wird der Stator in so viele Zonen unterteilt, dass in jeder Zone nur eine Kluppe ist. Für eine typische 65m lange Anlage, ergeben sich ca. 500 Zonen, von denen jede durch einen eigenen Umrichter betrieben wird [BOS98].
Entsprechend der gewünschten Sollposition der Kluppe wird in den Stator durch den Umrichter der Strom eingeprägt.

Die Kraftentfaltung zwischen dem Stator und dem Magneten auf der Kluppe ist von dem Versatz zwischen Strombelag im Stator zu der Position der Kluppe und der Größe des Stromes gegeben. Bei konstanten Strom ist der Zusammenhang in folgenden Bild zu sehen.
In der Vorzugslage , wo die Magnete genau über dem Strombelag, bzw. gegenüber der im Stator gebildeten Magnetpole, liegt tritt keine Längskraft auf. Je mehr die Kluppe aus dieser Position gezwungen wird, umso größer wird die Rückstellkraft (Lorentz Kraft) . Durch Verringern der Stromstärke wird die Kraft proportional verkleinert. Der maximal zulässige Strom wird durch die thermischen Verhältnisse im Motor definiert.



(F=Kraft, X="Lastwinkel",f=Frequenz, τ_p=Polteilung)

Abbildung 4: Kraftentwicklung gesteuert

Im gesteuerten Betrieb wird die Stromstärke fest eingestellt. Abhängig von der aktuellen Kraft stellt sich bei dem Lastwinkel ein Gleichgewicht ein, bei dem die magnetische Kraft der Last entspricht.

Die Verluste im Motor entstehen vorwiegend als Kupferverluste, die quadratischn von der Stromstärke abhängen. Der Strom und somit die Verluste können dadurch minimiert werden, dass der Strom soweit reduziert wird, sodass das Maximum der Kraftkurve genau der benötigten Kraft entspricht. Mit anderen Worten befindet sich die Kluppe immer am Scheitelpunkt der Kurve. Im geregelten Betrieb wird die Stromwelle immer so positioniert, dass gerade der Scheitelpunkt der Kurve aktuell ist. Die Stromstärke wird so eingestellt, dass die benötigte Kraft erzeugt wird.
Da beim bisher eingesetzten gesteuerten Betrieb die Information fehlt, welche Kraft augenblicklich benötigt wird, wurde dauernd mit dem maximalen Strom gearbeitet:

- Eine Lastreserve entsprechend der maximal auftretenden Kraft erfordert ein Anheben des Betriebsstromes über des augenblicklich notwendige Maß
- Dadurch entstehen nennenswerte Zusatzverluste im Motor, in den Motorkabel und in den Umrichtern.
- Das System zeigt nur eine geringe Dämpfung bei Laständerungen.
- Auch kurzzeitige Lastspitzen können zum Aussertrittfallen des Motors führen. Das Aussertrittfallen führt zu einem Anlagenstillstand für ca 30 Minuten. Das während dieser Zeit die Anlage zwar Energie verbraucht, aber keine Folie produziert wird, ist ein solches Aussertrittfallen auch aus dem Blickwinkel Energie zu vermeiden.

Eine zusätzlich Dämpfung konnte bisher durch ein geeignete Aufschaltung von beobachten Größen zu der Sollposition des Stromes im Umrichter erreicht werden ohne aber die Verluste zu senken [BOS97].

7.2. Sensorlose Regelung

Eine wesentliche Verbesserung des Antriebssystems kann durch eine sensorlose Positionsregelung erreicht werden, wie sie in zahlreichen Arbeiten für rotierende oder lineare Motoren beschrieben ist [Vas98], [JL96] und [Sch96]. Die Umsetzung auf eine LISIM®-Anlage stellt aber folgende Anforderungen, die bisher noch nicht gelöst waren:

- Die Aufenthaltsdauer einer Kluppe in einer Zone kann sehr kurz sein, typisch 150 ms, minimal 70 ms. Dadurch muss die Positionsschätzung extrem schnell sein.
- Die Durchflutung ist stark ortsabhängig
- Verschiedene Kluppen können unterschiedliche Durchflutungen aufweisen.

Andererseits ist ein kritische Betriebsfall, der Stillstand, dem unzählige Arbeiten gewidmet worden sind, hier nicht gefordert. Eine Folienanlage muss zwar vom Stillstand aus ohne Material angefahren werden können, die Anforderungen an die Positionsgenauigkeit sind aber dabei gering. Während der Produktion muss nur ein Bereich von 1:3 beherrscht werden. Deshalb wurde ein Verfahren der Flussschätzung verwendet, das die Besonderheiten dieses Motors berücksichtigt.

7.3. Modell des Motors

Ausgangspunkt ist die Spannungsgleichung im Stator:

$$\vec{U} = R_S * \vec{I}_S + L_S * \frac{d\vec{I}_S}{dt} + \frac{d\vec{\Psi}_S}{dt} \qquad (2)$$

wobei U die Statorspannung, R_S der Statorwiderstand, I_S der Statorstrom, L_S die Statorinduktivität und Ψ_S die Flussverkettung der Kluppe in die Statorzone ist. Der Statorstrom und die Statorspannung werden im Umrichter erfasst. Die Parameters R_S und L_S werden hier als konstant und bekannt angenommen. Details zu Bestimmung dieser Parameter werden unten erörtert. Somit ist die einzig unbekannte Größer der Statorfluss Ψ_S , der durch Umstellung aus (2) berechnet werden kann:

$$\frac{d\vec{\Psi}}{dt} = \vec{U} - R_S * \vec{I}_S - L_S * \frac{d\vec{I}_S}{dt} \qquad (3)$$

dadurch kann zu jedem Zeitpunkt die Änderung des Flusses und daraus der aktuelle Fluss berechnet werden. Eine Implementierung der Gleichung (3) stellt sich aber vor Allem durch die zeitliche Ableitung des Stromes I_S als sehr problematisch heraus, welche das immer vorhandene Messrauschen unzulässig erhöht. In der Praxis wird durch die zeitliche Ableitung eines Signals unzulässig große Fehler ins System eingebracht. Deshalb wird die Gleichung (3) in eine integrale Form gebracht

$$\vec{\Psi} = \int (\vec{U} - R_S * \vec{I}_S)dt - L_S * I_S \qquad (4)$$

Die Implementierung von (4) ist sehr einfach, lediglich die offene Integration der Ströme und der Spannungen wird noch durch ein PT1 Filter ersetzt [Vas98], [Deg98], [Ak00] und [Oht92]. Dadurch entsteht zwar für sehr kleine Frequenzen ein Phasenfehler, der sich hier aber nicht weiter auswirkt, da die minimalen Betriebsfrequenz von 9 Hz weit genug über der Knickfrequenz des PT1 Filters von 1 Hz liegt.

Anders als in den bekanten Arbeiten über sensorlose Regelung , ist hier aber die Amplitude des Flusszeigers ortsabhängig, da die Amplitude des Flusszeigers null sein muss, solange die Kluppe außerhalb der Zone ist.

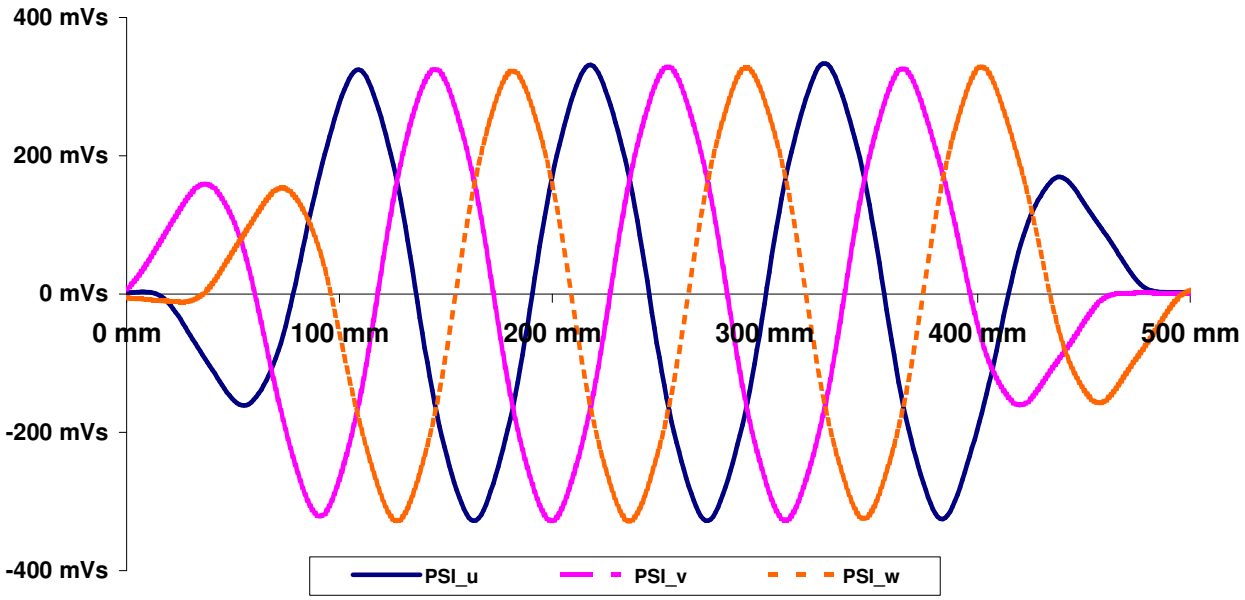


Abbildung 5: Fluss über Position in Phasendarstellung

In Abbildung 5 sieht man ein zeitlich versetztes Anklingen der drei Phasen, zuerst in V, dann in U und schließlich in Richtung W. Anschließend stellen die Flüsse über

einen bestimmten Bereich annähenernd eine Sinuskurve dar. In der orthogonalen Darstellung in Statorkoordinaten ergibt sich Abbildung 6.

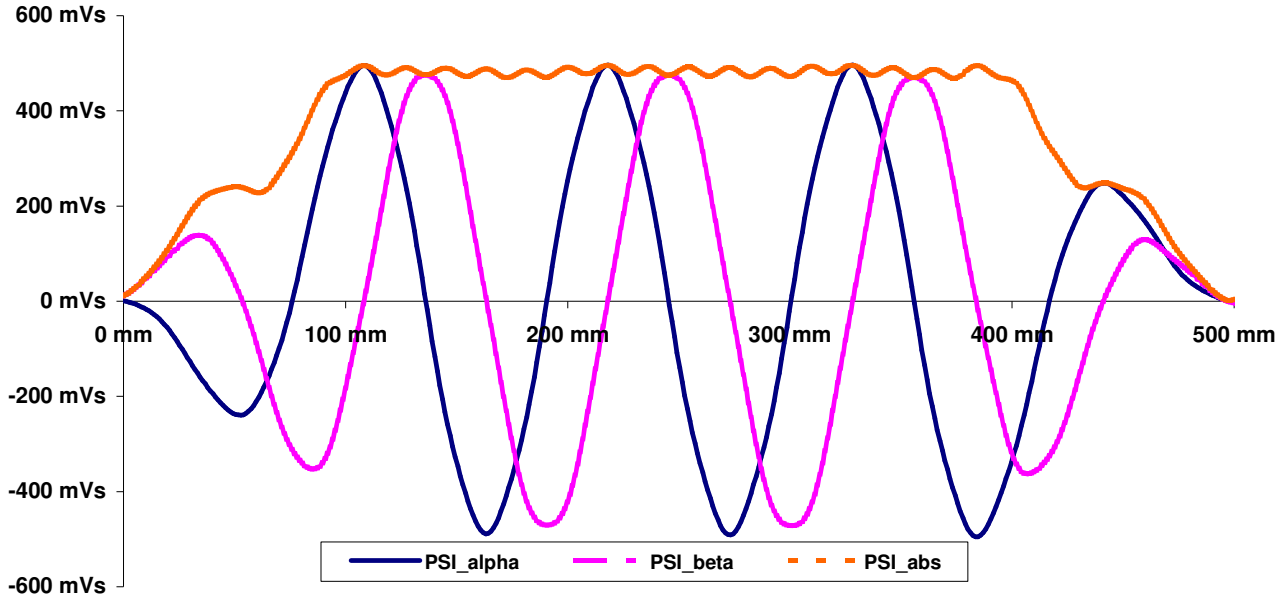


Abbildung 6: Fluss über Position in Statorkoordinaten

Die Statorkoordinaten wurden deshalb gewählt, da die aktuelle Rotorlage zunächst ja noch nicht bekannt ist.

In dieser Darstellung erkennt man ebenfalls das Ansteigen des Flusses beim Eintritt der Kluppe. Weiters wird hier besser sichtbar, dass der Fluss auch im Beriech gleichmäßiger Überdeckung, das heißt im mittleren Bereich der Zone, ortsabhängig ist. Hier handelt es sich um ein periodische Auf- und Abklingen der Flußamplitude. Um diesen Zusammenhang richtig zu modellieren, wird der Fluss nicht als rotierender Zeiger mit konstanter Länge angenommen, sondern er wird durch zwei Kennlinien PSI_alpha_ref und PSI_beta_ref beschrieben. Diese Referenzkurven enthalten alle Geometrieeinflüsse, wie nicht konstanter Luftspalt, Parallelitätsfehler und Asymmetrie der Wicklung [OZ03].

In einer andern Darstellung kann man denselben Effekt noch besser erkennen: In der Ortskurve wird der Flussvektor in den zwei orthogonale Komponente PSI_alpha und PSI_beta dargestell:

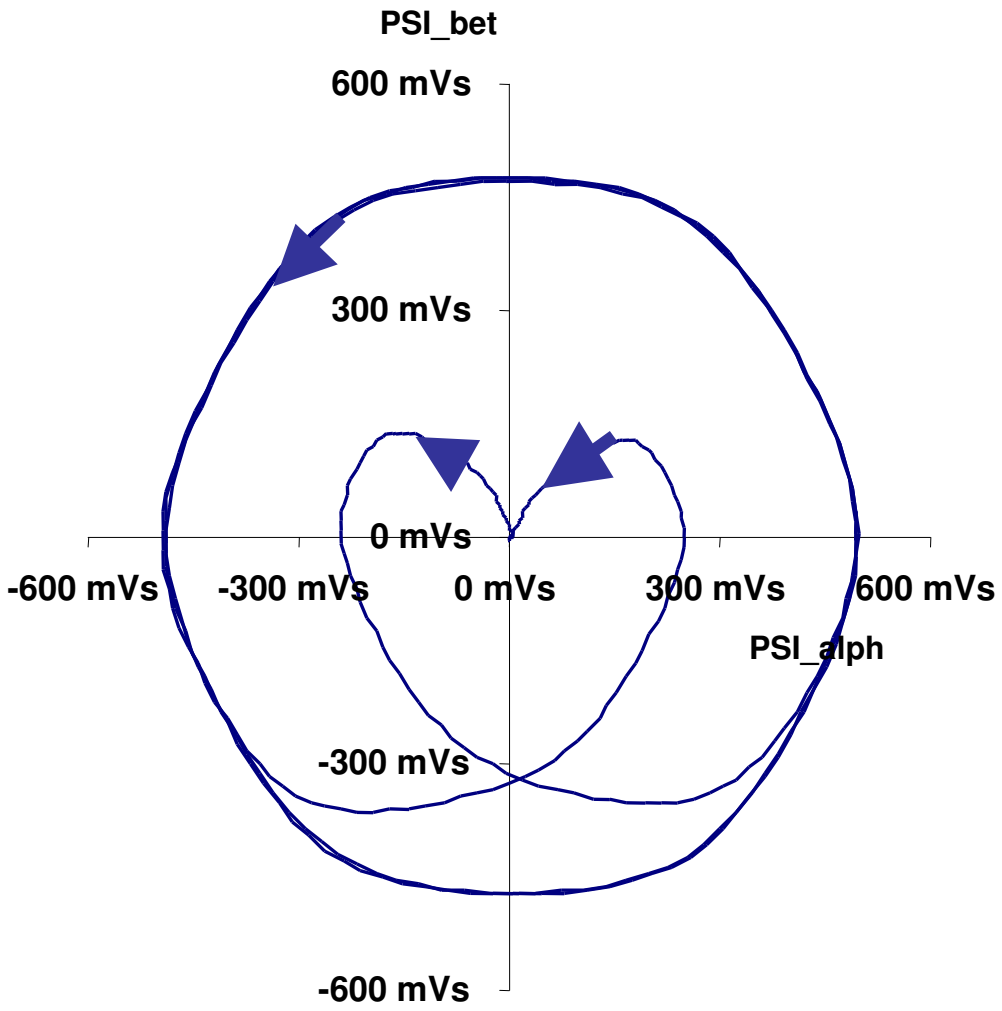


Abbildung 7: Fluss als Ortskurve.

Eine konstante Flussamplitude würde sich als Kreis abbilden. Das annähernd sechseckige Aussehen entsteht durch die Oberwellen im mittleren Bereich des Abbildung 6. Das Ein und Austreten der Kluppe wird durch den Ast, der aus dem Ursprung kommt, bzw, den , der in den Ursprung lauft dargestellt.

7.4. Positionsschätzung

Diese beiden Referenzkurven PSI_alpha_ref und PSI_beta_ref werden für jede Zone einmal aufgezeichnet und im Antrieb hinterlegt. Diese Referenzkurven enthalten alle Systemeigenschaften, wie Geometrie der Wicklung, Goemtrie und Materialeigenschaften des Statorbleches und Luftspalt. Während des Betriebes wird der aktuelle Fluss nach Abbildung 8 entsprechend der Gleichung (4) mit PT1 Filter anstatt der Integratoren bestimmt :

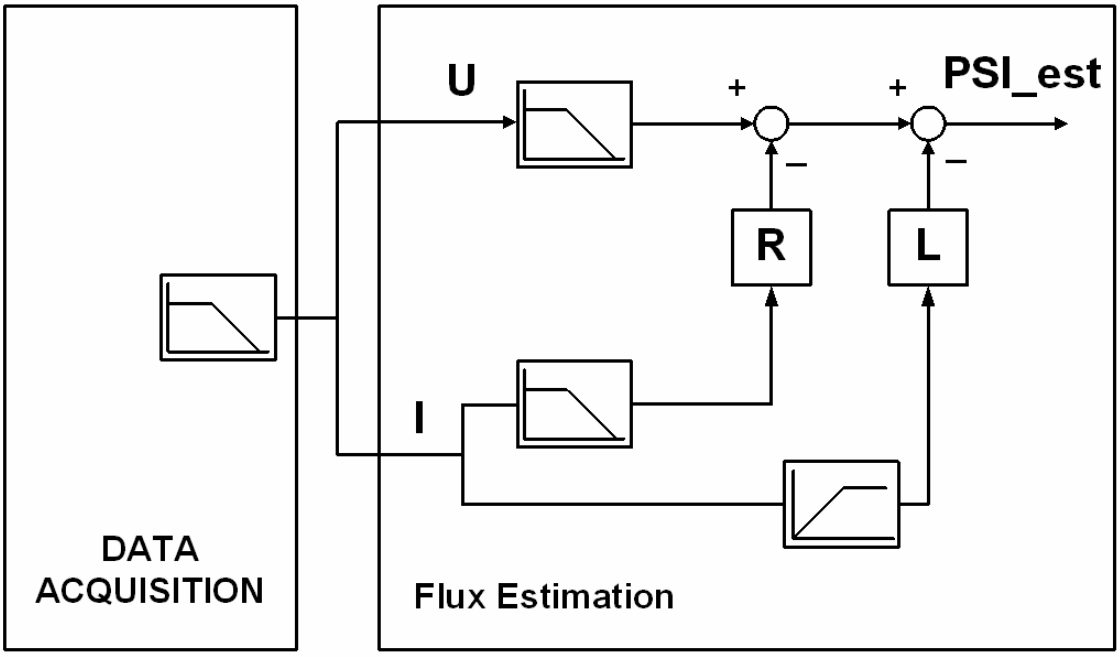


Abbildung 8: Flussschätzung

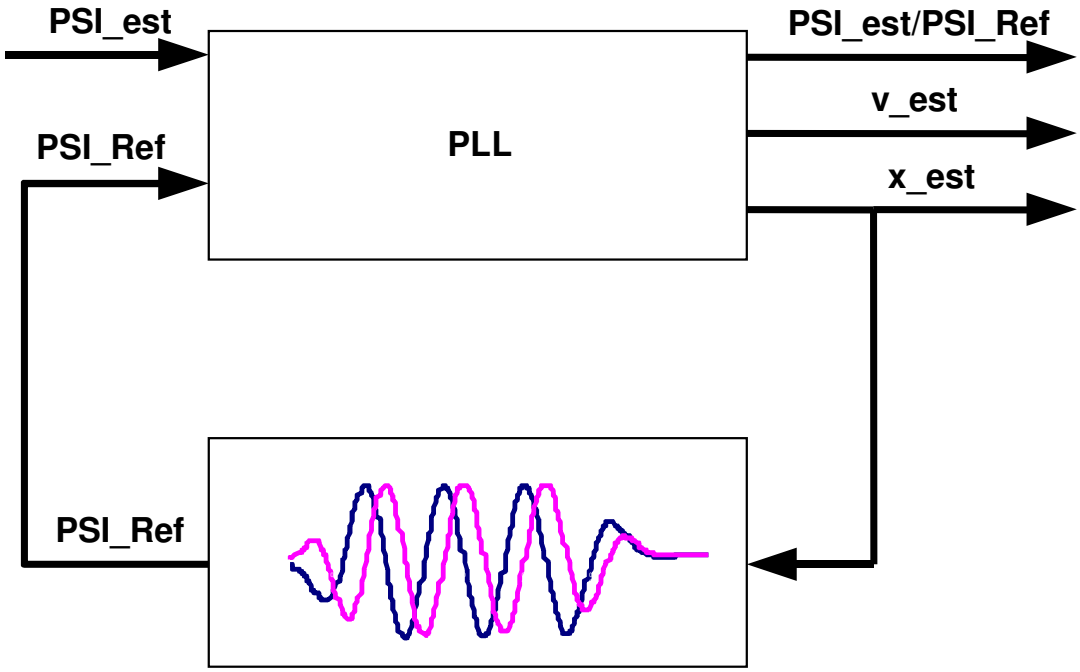


Abbildung 9: Positionsschätzung

Die eigentliche Positionsschätzung wird entsprechend Abbildung 9 als PLL (Phase Lock Loop) durchgeführt. Dabei wird jene Position gesucht, in der die beiden Flüsse aus den Referenzkurven die beste Übereinstimmung mit den augenblicklichen Flusswerten bietet. Diese PLL liefert zu jedem Zeitpunkt eine Schätzung der Istposition der Kluppe. Diese Istposition ermöglich es den Strom im Motor soweit zu

reduzieren, bis die Istposition der Kluppe der Sollposition noch entspricht, d.h. die Differenz zwischen beiden ein vordefiniertes Maß nicht überschreitet.
Um die unterschiedlichen Flusswerte verschiedener Kluppen abzubilden wird für jedes Kluppe eine Amplitudenanpassung der Referenzkurve durchgeführt. Dabei wird neben der Schätzung der Istposition auch die Referenzkurve für jede Klupe in der Größe soweit angepasst, bis die Übereinstimmung zwischen Istwert des Flusses und der Referenzkurve optimal ist.
Die Positionsregelung der Kluppe wird schließlich durch einen gängigen PI Regler durchgeführt.

7.5. Parameteradaption.

Die Systemparameter Widerstand R_S und Induktivität L_S sind für das Modell sehr wichtig . Sie sind nur näherungsweise konstant und dem Antriebsregler nicht a priori bekannt. Der Widerstand hat die bekannte Temperaturabhängigkeit, die besonders bei der geforderten großer Leistungsdichte und hoher Temperaturklasse der Wicklung einen bedeutenden Einfluss hat. Bei dem Temperaturkoeffizienten von $3{,}9*10^{-3}$/K für Kupfer bewirkt eine Erhöhung von 20°C auf 150°C eine Erhöhung des Widerstandes um 50%!. Die Änderung der Induktivität ist geringer, dennoch wird auch dieser Parameter online nachgeführt. Eine manuelle Messung der Parameter während der Inbetriebnahme würde wegen der hohen Anzahl der Zonen auch einen sehr großen Aufwand darstellen.

Deshalb wurde ein Verfahren zur Parameteradaption entwickelt, d.h. die wichtigen Systemparameter werden laufend kontrolliert und gegebenenfalls werden diese Werte im Umrichter angepasst. Ähnlich der Positionschätzung werden diese Parameter aus messbaren Größen errechnet.

Wie oben gezeigt ist die induzierte Spannung nach (2) bekannt , somit kann sie im Betrieb vorgehalten werden und tritt für diese Parameteradaption nicht mehr auf. Die Spannungsgleichung entspricht dann der einer einfachen R-L Schaltung.

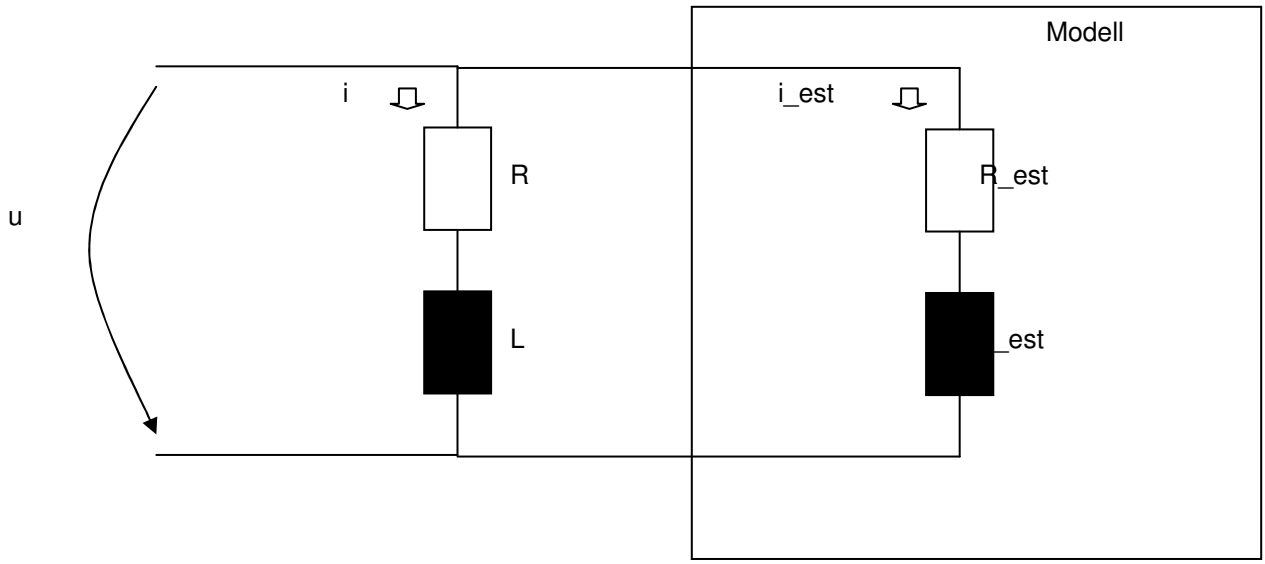


Abbildung 10: Parameteradaption

Die an den Stator ausgegebene Spannung bewirkt am Stator eine Stromänderung. Gleichzeitig wird sie einem Rechenmodell im Umrichter zugeführt, der die zunächst nur ungenau bekannten Parameter R_est und L_est besitzt. Gleichzeitig, während sich im Stator ein physikalischen Strom I(t) einstellt, wird der Modellstrom I_est aufgrund der Parmeter L_est und R_est berechnet. Für beide System gelten die folgende Gleichungen, wobei die Größen des Modells mit dem Index „est“ bezeichnet werden.

$$U = R * i + L * \frac{di}{dt} \qquad (5)$$

und nach Integration nach der Zeit

$$\int Udt = R * \int idt + L * i \qquad (6)$$

Da beide Systeme mit der selben Spannung gespeist werden, ist auch das Spannungsintegral für beide Systeme identisch und somit gilt

$$R * \int idt + L * i = R_est * \int i_estdt + L_est * i_est \qquad (7)$$

Im Stromnulldurchgang ist I null und I_est hinreichend klein, sodass in diesen Zeitpunkten die Gleichung vereinfacht werden kann:

$$R * \int idt = R_est * \int i_estdt \qquad (8)$$

und somit der Widerstand nach

$$R = R_est * \frac{\int i_estdt}{\int idt} \qquad (9)$$

bestimmt wird .

Diese Berechnung wird in jedem Nulldurchgang des Stromes durchgeführt und benötigt so keine spezielle Anregung. Abhängig vom Betriebszustand kann die Zeit zwischen zwei Nulldurchgängen variieren. Speziell bei kurz hintereinanderliegenden Nulldurchgängen des Stromes sind beide Intergrale sehr klein, was zu einem ungenauen Ergebnis führen kann. Deshalb wird der zur Flussschätzung verwendete Widerstand nur langsam den Werten aus Gleichung (9) nachgeführt. Dadurch bewirken einzelne Messfahler nur eine geringe Parameterabweichung. Da die Änderung der Parameter nur langsam auftritt, ist dieses Verfahren zulässing. Mit anderen Worten wird die Erwärmung des Motors nur langsam- über Minuten-fortschreiten und somit die Änderung des Widerstandes ebenfalls nur langsam auftreten

Analog zu der Widerstandsschätzung wird die Statorinduktivität L zu den Zeitpunkten, in denen das Integral aus idt null ist bestimmt:

$$L = L_est * \frac{I_est}{I} \qquad (10)$$

Dadurch werden die Modellparameter R_est und L_est den Systemparametern nachgeführt und stehen so für die Flusschätzung zur Verfügung, was die Genauigkeit des Systems wesentlich erhöht.

Die Parameteradaption erfolgt im Statorsystem, getrennt für die alpha und die beta-Achse. So kann für jede Achse ein eigener Wert bestimmt werden. Ein Identität von R_{alpha} zu R_{beta} , bzw. von L_{alpha} zu L_{beta} ist nicht gefordert.

7.6. Entwicklungstufe Systemkonzept

Der theoretischen Teil umfasste die Literatursuche und die Simulation des System auf Matlab-Simulink. Somit wurde das Prinzip des Positionsschätzer bei veränderlichen Fluß nachgewiesen.
Dazu wurde der Motor entsprechend den oben beschriebenen Parametern modelliert und Flusserfassung, der PLL und die Parameterschätzung. Die Anforderung an die Strom und Spannungsmessung wurde definiert.

7.7. Versuche am rotierenden Motors.

Dazu wurde ein Standardservomotor verwendet. Dabei entfallt die oben beschriebene Ortsabhängigkeit des Flusses, d.h. die Amplitude des Flusses ist konstant. Somit reduzierte sich das verkoppelte System wesentlich. Der in dem rotierendem Motor ohnehin vorhandene Istwertgeber diente zur Überprüfung der Positionsschätzung.
Hierbei konnte der Hardware getestet werden und das Verfahren unter der Voraussetzung des konstanten Flusses gestestet werden.

7.8. Auswahl des Antriebsreglers

Mit den aus 7.6 und 7.7 gewonnenen Erkenntnissen wurde eine Marktstudie durchgeführt. Anforderungen an den Antriebsregler waren:

- Kompakte Bauweise
- Geringe Schaltverluste
- Hohe Dynamik
- Freie Programmierbarkeit
- Hohe Rechenleistung
- Frei einstellbare Pulsfrequenz
- Zwischenkreisverbund
- Wasserkühlung
- Hoher Ausbildungsgrad und Motivation unter den Mitarbeiter des Herstellers.
- Geringer Preis

Es wurden 4 Firmen näher untersucht und schließlich die Firma Aradex, Lorch, ausgewählt.
Das eingesetzte System besteht aus Geräten, die drei Antriebsachsen in einem Gerät vereinen. Das heißt, ein Umrichter kann drei Zonen der Linearmotoren betreiben. Dadurch sinken die Anzahl der Geräte und die Kosten. Die geforderte hohe Dynamik und hohe Rechenleistung wird durch ein zweistufige Hardware erreicht: Schnelle Signale werden durch ein frei programmierbares Logikarray verarbeitet, das mit 500 kHz taktet. Langsamere Signale werden durch einen Prozessor verarbeitet, der auch wesentlich komplexere Befehle ausführen kann.

Die einzelnen Geräte sind durch einen schnellen digitalen Bus untereinander und mit dem Leitrechner verbunden.

Der Zwischenkreisverbund ermöglicht die Energie, die eine Zone zurückspeist, in den anderen Zonen zu verwenden. Das bisherige System hatte auf jedem Umrichter einen Bremswiderstand, der diese Rückleistung lokal vernichtet hat.

Die Geräte sind anreihbar und werden auf einer Wasserkühlplatte montiert.

Spezielle für diese Anforderung mussten folgende Adaptionen an den Geräten durchgeführt werden:

- Erhöhung der Rechenleistung
- Erhöhung der Auflösung der Strommessung
- Verbesserte Unterdrückung des Offsets
- Integration einer Spannungsmessung
- Die Verluste im Umrichter wurden durch Verringerung der Schaltfrequenz auf 4 kHz und durch Einsatz neuerster Bauelemente (IGBT) um 20 % reduziert.

Diese Adaptionen sind teilweise beim Hersteller und teilweise bei Brückner Maschinenbau durchgeführt worden.

Abbildung 11: 10 Umrichter mit je 3 Achsen (30 Achsen)

7.9. Versuche am Linearmotorteststand.

Der größte Teil der Entwicklungsarbeit wurde am Linearmotorteststand durchgeführt. Der Teststand besteht aus einem Oval, mit einer 18 m langer Schiene. Dies entspricht einer Seite der Reckanlage, die jedoch stark verkürzt worden ist. Es sind aber alle relevanten Teile vorhanden:

- Einlauf mit Kluppenstack: der Bereich in dem die Kluppen einen geschlossenen Zug bilden.
- Beschleunigungszone: Im Prozess wird diese „Reckzone“ genannt, wo die Beschleunigung und somit die Separierung erfolgt.
- Zone konstanter Geschwindigkeit
- Umlenkung (Kurve)
- Rücklauf inklusive Verzögerung der Kluppen
- Umlenkung.

Abbildung 12: Linermotorteststand

Dieser Teststand besteht aus 57 Zonen.
Alle Zonen wurden auf die neue Antriebshardware umgebaut. Ein neuer Leitrechner wurde dazu installiert.

Zunächst musste die gesamte auf den alten Umrichtern verwendet Software auf die neuen Antriebregler portiert werden.
Das bei am rotierenden Motor entwickelte Regelungssystem wurde auf die Anforderung für Linearmotoren adapiert:

- Das Eintreten (und Austreten) der Kluppe in die Zone stellt eine sehr schnell Änderung des Flusses dar.
- Die Kluppen haben unterschiedliche Magentisierungszustand wegen Fertigungstoleranzen.
- Eine Kommunikation zwischen den Antrieben ist während der Übergabe der Kluppe an die nächste Zone notwendig.

Zur Überpüfung der geschätzen Position wurde eine Lasertriangulationsmessug auf die vorbeifahrenden Kluppen eingesetzt. Das Messsystem biete Auflösung von 0,1 mm bei 500 Hz Messrate.

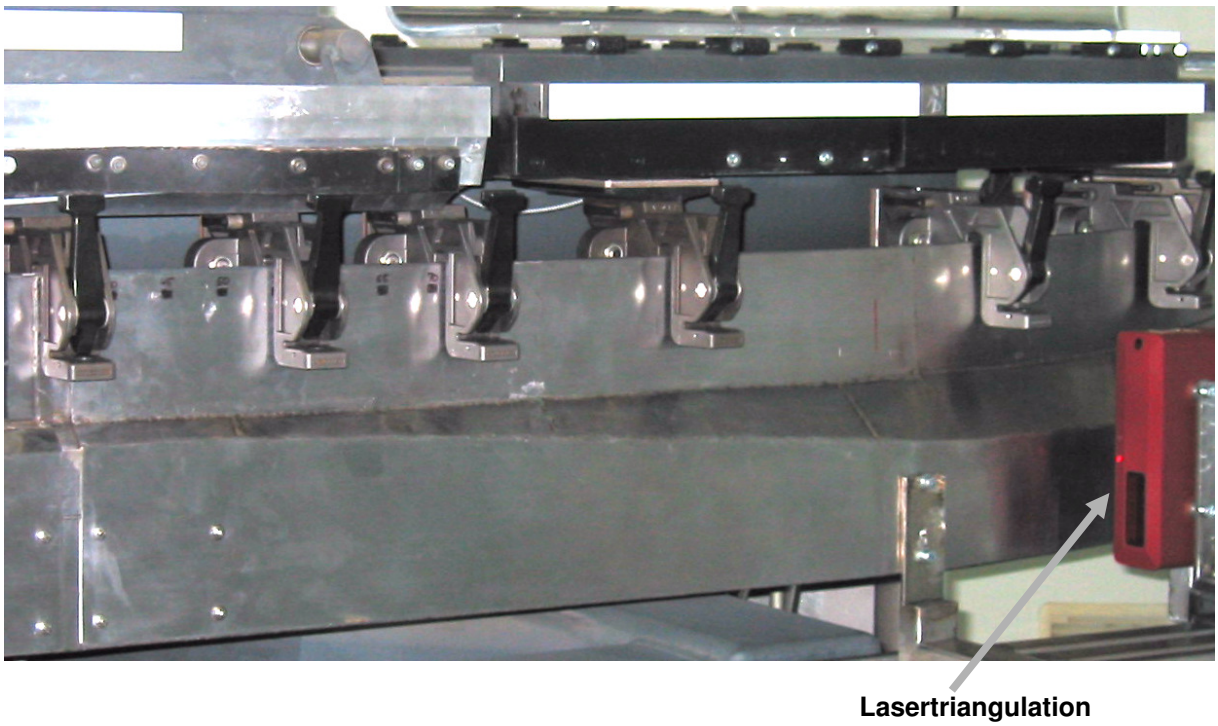


Abbildung 13: Detail des Linearmotorteststandes mit Lasertriangulation.

Der untere Teil der Kluppen ist durch ein Schutzblech verdeckt.

Folgende Messungen wurden durchgeführt:

- Inbetriebnahme des gesteuerten Betriebs
- Flussberechung anhand Formel (4)
- Aufnahme der Referenzkurve
- Positionsschätzung durch PLL
- Optimierung des Eintreten und Austreten der Kluppe.
- Messung bei verschiedenen konstanten Geschwindigkeiten.

Der gesteuerte Betrieb konnte relativ schnell umgesetzt werden.

Bei der Flussberechnung zeigte sich, dass die Genauigkeit der Spannungs- und Strommessung erhöht werden musste, um die geforderte Gesamtgenauigkeit zu erreichen.

Die Aufnahme der Referenzkurve war mit den schon vorhanden Softwaremodulen leicht zu realisieren.

Bei dem PLL bestand die Aufgabe ein Optimum zwischen Genauigkeit der Positionsschätzung und dem Rechenaufwand zu finden. Schließlich wurde eine gute Strategie gefunden, mit der vorhanden Rechenleistung alle 0,25 ms eine Positionsschätzung mit einer Genauigkeit von ca 1 mm zu finden.

8. Fazit

Die Positionsschätzung erfüllt die Ziele ausgezeichnet

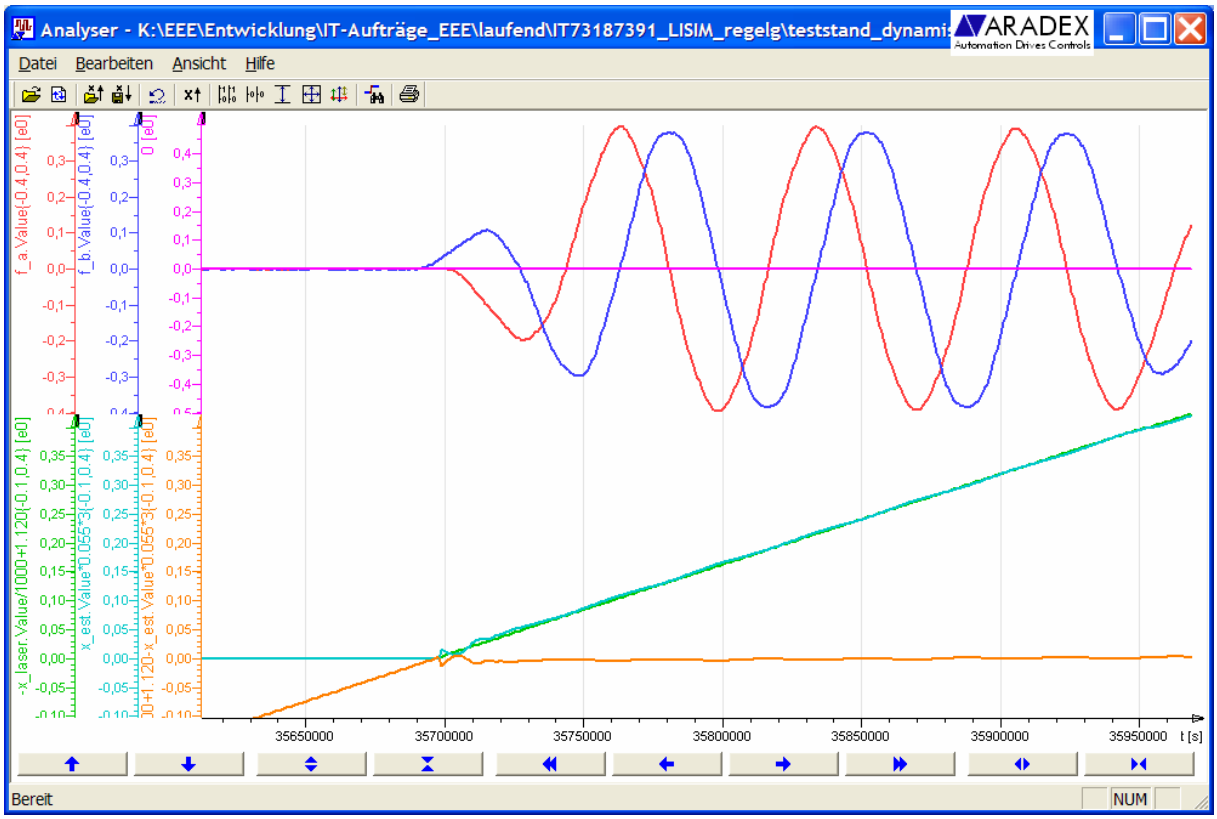


Abbildung 14: Positionsschätzung am Linearmotorteststand.

Im Abbildung 14 sieht man oben die beiden Flusskomponenten PSI_alpha und PSI_beta. Im unteren Teil liegen die Laserposition und die geschätzte Position so eng übereinander, dass sie hier als eine Linie wahrgenommen werden.
Vor dem Eintreten der Kluppe (Anstieg der Flüsse) ist die geschätzte Position 0, danach folgt die geschätzte Position sehr gut der gemessenen Position.
Die Abweichung zwischen gemessener und geschätzter Position ist maximal 2 mm oder 6 Grad elektrisch.

Positionsregelung:
Bei Verwendung der Positionsregelung wird nur mehr der Strom eingeprägt, der zur Überwindung der aktuell anliegenden Kräfte benötigt wird. Durch die Kenntnis der aktuellen Position wird der Strom bei einer Abweichung von der gewünschten Sollposition sofort erhöht oder verringert.

Abbildung 15: Strom bei Steuerung und Regelung

Im Bild 15 sieht man im linken Teil (kleiner 2 s) den Strombetrag (Gesamtstrom einer Zone) bei gesteuerten Betrieb. In dieser Zeit ist der Strom fest auf 5,4 A einstellt. Im Zeitpunkt 2 s wird auf sensorlose Regelung umgeschaltet.
Währen der Zeit, in der keine Kluppe in der Zone ist, wird der Strom auf 0 gestellt. Beim Eintritt der Kluppe sieht der Antriebsregler eine Positionsabweichung, die er durch einen schnellen Stromanstieg kompensiert. Danach pendelt sich der Strom auf ca. 1.1 A ein.

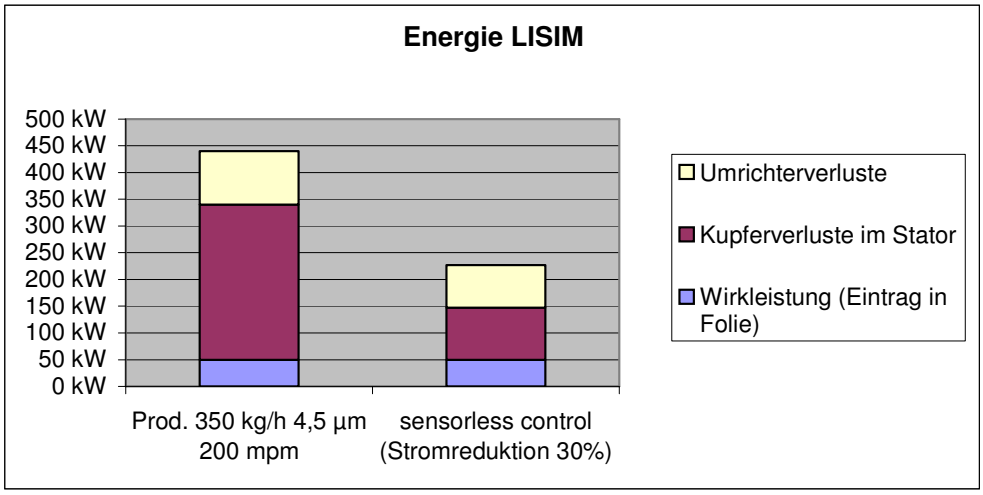
Die elektrische Gesamtleistung am Teststand verringerte sich von 57 kW (gesteuert) auf 19,1 kW (sensorlos geregelt), das ist eine Einsparung um 66,4 %.
Im gesteuerten Betrieb hat eine typische Produktionsanlage eine Verlustleistung von 290 kW, die durch den Einsatz der sensorlosen Regelung auf 97 kW verkleinert wird. Dadurch werden dauernd 193 kW eingespart, was bei 7500 Betriebsstunden im Jahr 1, 45 Mio. kWh ausmacht.

Das Einsparziel von 51 % der Verluste wurde mit 66,4 % übertroffen.

Die Zusätzlichen Vorteile entstehen durch die Reduktion der Umrichterverluste von 20 %. Bei einer Produktionsanlage sind dies 20 kW, die sich im Jahr auf 150 000 kWh summieren.

Die Gesamteinsparung bei dieser Anlage sind somit 1,60 Mio. kWh oder 1600 MWh!

Leistungsbetrachtung LISIM anhand Anlage LUX 1222



	Prod. 350 kg/h 4,5 µm 200 mpm	sensorless control (Stromreduktion 30%)	Unterschied	Unterschied
Wirkleistung (Eintrag in Folie)	50 kW	50 kW		
Kupferverluste im Stator	290 kW	97 kW	-193 kW	-67%
Umrichterverluste	100 kW	80 kW	-20 kW	-20%
Gesamtleistung	440 kW	227 kW	-213 kW	-48%
Summe Verluste	390 kW	177 kW	-213 kW	-55%
Einsparung		213 kW		
Betriebsstunden/Jahr	7500 h/a			
Energieeinsparung/Jahr [kWh]		**1.597.500 kWh**		

Abbildung 16: Energieeinsparung bei einer Anlage

Brückner plant jährlich eine solche Anlage zu installieren, heute sind schon 6 Anlagen weltweit in Betrieb, die mit diesem neuen System ausgerüstet werden können.

9. Literaturverzeichnis

[Sca99] Scarati M.A., Simultaneous Biorientation of PP Based Films – Quantum Leap in Film Technology, PP'99, 8Th Annual World Congress in Zürich, Switzerland, 14-16 Sep 1999

[Cam99] Campell R.N., Polypropylene Film Comparison From Sequential Simultaneous Tenter BOPP Process, TAPPI Polymers, Lamination & Coatings Conference in Atlanta, USA, (23-25 Aug 1999)

[BOS98] Breil, J.; Oedl, G.; Sieber, B.: Synchronous Linear Drives for Many Secondaries with Open Loop Control; Proc. LDIA 1998 Tokyo 142-146

[BOS97] Breil, J.; Oedl, G.; Sieber, B.: Gesteuerter Linearantrieb mit vielen Sekundärteilen, VDI Bericht 1346 (1997) S63-81

[Vas98] Vas, P.: Sensorless Vector and Direct Torque Control, Monographs in Electrical and Electronic Engineering, Oxford University Press, 1998, ISBN 0-19-856465-1.

[JL96] P.L. Jansen, R.D. Lorenz, Transducerless Field Orientation Concepts Employing Saturation-Induced Saliencies in Induction Motors, IEE trans. On Ind. Appl. Vol. 32, No. 6, Nov. 1996, pp1380-1393.

[Sch96] M. Schroedl, Sensorless Control of AC Machines at Low Speed an Standstill Based on INFORM Method, Proc. IEEE-IAS 1996 Annual Metting, San Diego, CA USA, Oct. 1996 pp 270-277.

[Deg98] M.W. Degner, Flux, Position and Velocity Estimation in AC Machines Using Carrier Signal Injection, Ph.D. Dissertation, University of Wisconsin-Madison, 1998

[AK00] Kan Akatsu and Atsuo Kawamura, Senior Member, IEEE "Sensorless Very Low-Speed and Zero-Speed Estimation with Online Rotor Resistance Estimation of Induction Motor without Signal Injection". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36. No. 3, May/June 2000

[Oht92] Tsugutoshi Ohtani, Member, IEEE, Noriyuki Takada, and Koji Tanaka "Vector Control of Induction Motor without Shaft Encoder" ". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28. No. 1, January/February 1992

[OZ03] Oedl G, Zintz Wolfgang, Sensorless Position Control of Non Sinusoidal Flux Distribution, Linear Drives for Industrial Application LDIA2003, Birmingham England, 8th 10th Sept. 2003