

# Diagnostiksystem i gaffeltruckar

**Examensarbete**  
utfört i **Fordonssystem**

av

**Magnus Björklund och Gun Persson**

Reg nr: LiTH-ISY-EX-3415-2003

28 maj 2003



# Diagnostiksystem i gaffeltruckar

Examensarbete

utfört i **Fordonssystem**

**Institutionen för systemteknik**

vid **Linköpings universitet**

av **Magnus Björklund och Gun Persson**

Reg nr: LiTH-ISY-EX-3415-2003

Handledare BT:

**Göran Valfridsson**

Handledare ISY:

**Jonas Biteus**

Examinator:

**Erik Frisk**

Linköping 28 maj 2003





**Avdelning, institution**  
Division, department  
Fordonssystem  
Department of Vehicular Systems

**Datum**  
Date  
2003-05-28

**Språk**  
Language

- Svenska/Swedish  
 Engelska/English  
 \_\_\_\_\_

**Rapporttyp**  
Report category

- Licentiatavhandling  
 Examensarbete  
 C-uppsats  
 D-uppsats  
 Övrig rapport  
 \_\_\_\_\_

**ISBN**

**ISRN**

**ISSN**

**Serietitel och serienummer**

Title of series, numbering

LiTH-ISY-EX-3415-2003

**URL för elektronisk version**

URL for electronic version

<http://www.vehicular.isy.liu.se>

<http://www.ep.liu.se>

**Titel**

Title

Diagnostic systems in forklift trucks

**Författare**

Authors

Magnus Björklund and Gun Persson

**Sammanfattning**

Abstract

This is a final thesis done at BT, considering one of their forklift truck models called Reflex. The first part of this report is about a preliminary investigation investigating what kind of diagnostic system BT wants to use, and also which demands there are to meet all expectations on such system. Secondly a diagnostic systems, which will show if the drive wheel is worn out, will be presented.

In the preliminary investigation, two kinds of diagnostic systems were mentioned. These were Model based diagnosis and Predictive analysis. Model based diagnosis is based on measurements made by sensors at the truck, while predictive analysis is based more on statistics and retrieved data about the lifetime of a truck in specific environments.

The diagnostic system for the drive wheel is based on a model made in Matlab's Simulink. Due to poor documentation, rough simplifications in the model have been made. However, one can still see the differences of principle.

The main thought was detecting a difference in the lowest torque level from the engine, varying the diameter of the drive wheel.

By measurements made directly at the truck, different torques could be observed with varying diameter of the drive wheel, varying load on the truck and varying friction in the gearbox. Using hypothesis tests, it is possible to say whether the drive wheel is worn out or not.

Results show that if the drive wheel diameter is reduced by 25 mm, torque is reduced by 7 % and if the drive wheel diameter is reduced as much as 50 mm, a torque reduction of 11 % would be achieved.

**Nyckelord**

Key words

Diagnostic systems, hypothesis tests, modelling, forklift truck, BT, model based diagnosis



# Abstract

This is a final thesis done at BT, considering one of their forklift truck models called Reflex. The first part of this report is about a preliminary investigation investigating what kind of diagnostic systems BT wants to use, and also which demands there are to meet all expectations on such system. Secondly a diagnostic system, which will show if the drive wheel is worn out, will be presented.

In the preliminary investigation, two kinds of diagnostic systems were mentioned. These were *Model based diagnosis* and *Predictive analysis*. Model based diagnosis is based on measurements made by sensors at the truck, while predictive analysis is based more on statistics and retrieved data about the lifetime of a truck in specific environments.

The diagnosis system for the drive wheel is based on a model made in Matlab's Simulink. Due to poor documentation, rough simplifications in the model have been made. However, one can still see the differences of principle.

The main thought was detecting a difference in the lowest torque level from the engine, varying the diameter of the drive wheel.

By measurements made directly at the truck, different torques could be observed with varying diameter of the drive wheel, varying load on the truck and varying friction in the gearbox. Using hypothesis tests, it is possible to say whether the drive wheel is worn out or not.

Results show that if the drive wheel diameter is reduced by 25 mm, torque is reduced by 7% and if the drive wheel diameter is reduced as much as 50 mm, a torque reduction of 11% would be achieved.

**Key words:** Diagnostic systems, hypothesis tests, modelling, forklift truck, BT, model based diagnosis





# Sammanfattning

Denna rapport behandlar ett examensarbete på en av BT:s truckmodeller, Reflex. Första delen i rapporten är en förundersökning om vilken typ av diagnostik som efterfrågas och vilka förväntningar BT har på ett diagnostiksystem. Sedan kommer ett exempel på hur ett diagnostiksystem som visar att drivhjulet är nedslitet kan konstrueras.

I förundersökningen kom två olika typer av diagnos på tal, *Modellbaserad diagnos* och *Tillgänglighetsanalys*. Modellbaserad diagnos bygger på mätningar av olika givare och sensorer på trucken, medan tillgänglighetsanalysen bygger på sparade data och statistik om hur en truck slits i olika miljöer.

Diagnostiksystemet för drivhjulet grundar sig på en modell som är gjord i Matlab/Simulink. Eftersom dokumentation över motorstyrningen är bristfällig, har grova förenklingar gjorts i modellen. Detta medförde att det var svårt att få en bra överensstämmelse med verkligheten. Dock kan de principiella skillnaderna i momentet från drivmotorn observeras vid införande av olika felparametrar.

Grundtanken var att en skillnad i den lägsta nivån på momentet från drivmotorn skulle förändras vid varierande hjuldiameter.

Genom mätningar på en truck har förändringar i momentkurvan från motorn kunnat ses vid olika diametrar på drivhjulet, last på trucken samt vid en ökad friktion i växeln. Genom hypotestest kan slutsatser dras om huruvida drivhjulet är slitet eller inte.

Resultaten av mätningarna visar att om hjuldiametern minskar med 25 mm, sjunker den lägsta nivån på momentkurvan ca 7 % och om diametern minskar 50 mm, sjunker momentkurvans lägsta nivå ca 11 %.

**Nyckelord:** Diagnostiksystem, hypotestest, modellering, gaffeltruck, BT, modellbaserad diagnos



# Förord

Det hela började vid en fika under en av LARM-dagarna 2002. Magnus kastade ur sig idén att vi skulle göra ex-jobbet ihop. Låter ju spännande att försöka hitta ett sådant som på ett smidigt sätt kan knyta ihop profilerna ”Teknisk Fysik” och ”Programvaruutveckling”. Vi satte oss ner och försökte hitta några områden som vi båda var intresserade av och som vi hade läst åtminstone någon kurs i. Det lutade åt modellbygge och simulering av något optiskt system. Då skulle vi båda få briljera med våra surt förvärvade kunskaper. Att vi ville vara på ett företag bestämde vi oss också ganska fort för. Dels för att på ett smidigt sätt slussas ut i verkligheten från den skyddande kokong som universitetsmiljön har varit, men också för att man har lite större möjlighet att få lite för besväret (läs pengar). Tyvärr visade det sig inte vara så enkelt. Här satt vi med en jättefin idé om vad vi ville göra, men inget företag som hade ett ex-jobb som bestod av dessa uppgifter.

Vi började vårt letande efter ett ex-jobb någon gång på våren. Vi tänkte att det var bäst att vara ute i god tid, då vi hade hört att det var ganska svårt nu för tiden. Men alla ställen vi sökte hos och ringde till, fick vi till svar att så här innan sommaren är det ingen som vet vad som kommer finnas till hösten. Kom tillbaka efter semestern, så kanske det finns något då. Så vi väntade till augusti och började ringa runt igen. Svaren vi fick denna gång var: ”Jaha, inte nu på en gång, i oktober alltså, då har vi inget än. Kom tillbaka när det närmar sig.” Tja, vad säger man. . . Nästa gång vi ringde var svaret: ”Vill ni börja i oktober, varför har ni inte sökt tidigare? Nu är ju alla platser tillsatta! Just nu har vi inga nya på gång, men kom tillbaka i januari.” Dom gjorde det inte lätt för oss. Av en tillfällighet hittade vi ett ex-jobb på BT som verkade intressant och äntligen napp! I denna rapport ska vi försöka berätta om vad vi har gjort under våra intensiva 20 veckor på BT Products i Mjölby.

MAGNUS BJÖRKLUND  
GUN PERSSON



# Tack till

Författarna vill rikta ett särskilt tack till följande personer för deras hjälp och stöd under vårt examensarbete.

<b>Biteus, Jonas</b>	Vår handledare på universitetet.
<b>Bärnström, Joakim</b>	För all värdefull hjälp vid examensarbetets början.
<b>Frisk, Erik</b>	Vår examinerator.
<b>Hallman, Kjell-Olov</b>	För förmedlade av kontakter.
<b>Hjorth, Mattias</b>	För L <sup>A</sup> T <sub>E</sub> X mallen.
<b>Hvittfeldt, Björn</b>	För L <sup>A</sup> T <sub>E</sub> X mallen.
<b>Lagerström, Joachim</b>	För all hjälp med mätutrustningen.
<b>Nygårdhs, Sara</b>	För hjälp med monstren Pontus och Findus.
<b>Valfridsson, Göran</b>	Vår handledare på BT Products AB.
<b>Vikman, Leif</b>	För all värdefull erfarenhet.

Förutom dessa specifika personer vill vi passa på att tacka alla anställda på BT i Mjölby för deras gästfrihet.



# Innehåll

<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>Sammanfattning</b>	<b>vii</b>
<b>Förord</b>	<b>ix</b>
<b>Tack till</b>	<b>xi</b>
<b>1 Inledning</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrund . . . . .	1
1.2 Syfte . . . . .	1
1.3 Metod . . . . .	2
1.3.1 Val av metod . . . . .	2
1.3.2 Metodens svagheter . . . . .	3
1.4 Källkritik . . . . .	3
1.5 Valda avgränsningar . . . . .	4
1.5.1 Undersökningen . . . . .	4
1.5.2 Drivhjulet . . . . .	4
1.5.3 Momentvärden . . . . .	4
1.6 Disposition . . . . .	4
<b>2 Förundersökning</b>	<b>7</b>
2.1 Några uttalade önskemål . . . . .	7
2.1.1 BT Products . . . . .	7
2.1.2 BT Svenska . . . . .	7
2.1.3 BT Europe . . . . .	8
2.2 Studiebesök i Växjö . . . . .	8
2.3 Olika synsätt på diagnostik . . . . .	9
2.3.1 Modellbaserad diagnos . . . . .	9
2.3.2 Tillgänglighetsanalys . . . . .	10
2.4 Truckens slitagedelar . . . . .	11
<b>3 Teori</b>	<b>13</b>
3.1 Varför modeller? . . . . .	13
3.2 Felisolering genom hypotestest . . . . .	14

3.2.1	Felmoder . . . . .	14
3.2.2	Felisolering genom strukturerade hypotestest . . . . .	15
3.2.3	Hypotestest . . . . .	17
3.2.4	Influensstruktur och Beslutsstruktur . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Modellkonstruktion</b>	<b>19</b>
4.1	Grundläggande tankar . . . . .	19
4.2	Modellering av truckens drivlina . . . . .	20
4.2.1	Modellkomponenter . . . . .	20
4.2.2	Gjorda förenklingar . . . . .	22
4.3	En tillståndsmodell . . . . .	23
4.4	Analys av tänkbara felparametrar . . . . .	25
4.4.1	Hjuldiameter . . . . .	25
4.4.2	Friktion i växellåda . . . . .	26
4.4.3	Lastvikt . . . . .	27
4.5	Begränsningar i modellen . . . . .	27
4.6	Konstruktion av hypotestest . . . . .	28
4.6.1	Beslutsstruktur . . . . .	28
<b>5</b>	<b>Verifiering</b>	<b>31</b>
5.1	Mätningar . . . . .	31
5.1.1	Mätutrustning . . . . .	31
5.1.2	Tillvägagångssätt vid mätning . . . . .	32
5.1.3	Mätpunkter . . . . .	32
5.1.4	Körcykel . . . . .	33
5.2	Mätresultat . . . . .	33
5.2.1	Signalmanipulation . . . . .	34
5.2.2	Jämförelse mellan olika körningar . . . . .	34
5.2.3	Resultat i siffror . . . . .	38
<b>6</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>41</b>
6.1	Resultat . . . . .	41
6.1.1	Hjuldiameterns inverkan på drivmomentet . . . . .	41
6.1.2	Friktionens inverkan på drivmomentet . . . . .	41
6.1.3	Lastens inverkan på drivmomentet . . . . .	42
6.2	Modellen . . . . .	42
6.3	Framtidsvisioner, tankar och idéer . . . . .	42
6.3.1	Vidareutveckling av diagnostiksystemet . . . . .	42
6.3.2	Vidareutveckling av modellen . . . . .	43
6.3.3	Övriga tankar . . . . .	44

## Bilagor



---

<b>A Simulinkmodell i Matlab</b>	<b>47</b>
A.1 Kommentarer till modellen . . . . .	47
A.2 Matlabkod . . . . .	48
A.3 Blockschemamodell . . . . .	49
<b>B Mätserier</b>	<b>51</b>
<b>C Notation</b>	<b>53</b>
<b>Litteraturförteckning</b>	<b>56</b>



# Kapitel 1

## Inledning

Detta kapitel kommer att behandla bakgrund och syfte för examensarbetet, metoden som användes och vilka begränsningar som valdes. I slutet kommer en disposition med läsanvisningar. Detta som hjälp till läsare med olika bakgrund att välja vilka delar av rapporten som är intressanta att läsa.

### 1.1 Bakgrund

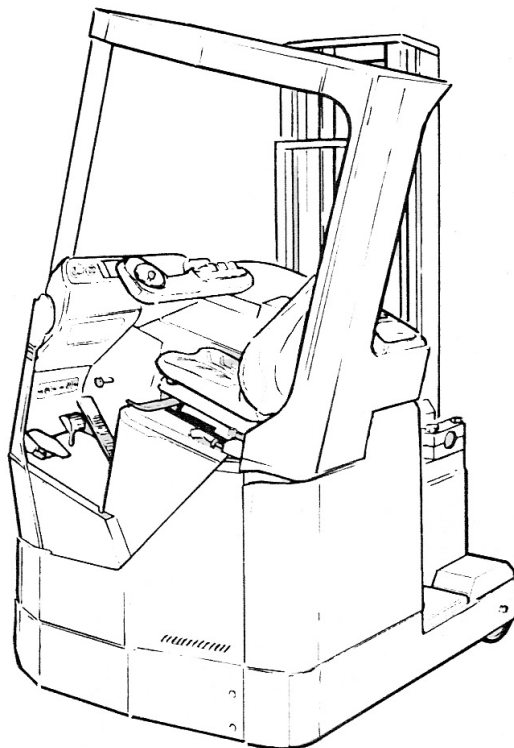
Då utvecklingen går framåt blir produkterna allt mer avancerade, BT:s produkter är naturligtvis inget undantag. Idag består BT:s truckar av avancerade system för att kunna garantera en säker och precis manövrering.

I samma takt som tekniken utvecklas ställs allt högre krav från kunder på service och underhåll. BT säljer allt fler truckar genom så kallade "rental"-avtal där kunden i princip hyr trucken och BT står för dess service- och underhållskostnader.

För att kunna ge truckarna en så korrekt service som möjligt finns önskemål om att ställa en diagnos på varje truck för att därur kunna beräkna och planera service och underhåll.

### 1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet var dels att göra en undersökning om vilka behov och önskemål på ett eventuellt framtida diagnostiksystem som de olika avdelningarna inom BT har, dels att utvärdera möjligheterna att diagnostisera BT:s truckar, då främst skjutstativtrucken Reflex (Figur 1.1), på ett tillfredsställande sätt. Ett önskemål var att enbart de givare och sensorer som finns i trucken i dagsläget skulle ingå i ett sådant system. Slutligen ville man också ha ett exempel på hur ett diagnostiksystem skulle kunna utformas.



**Figur 1.1:** Skjutstativtrucken Reflex.

## 1.3 Metod

Till en början ville BT att servicekonceptet skulle analyseras. Vad är det för typ av diagnos som efterfrågas? Genom att ställa frågor till olika nyckelpersoner inom organisationen samt ett tre dagars studiebesök på ICA:s och KF:s centrallager i Växjö, skapades en uppfattning om vad det var som egentligen efterfrågades. Efter detta analyserades resultatet och presenterades tillsammans med en möjlig lösningstillämpning för modellbaserad diagnos. För att påvisa hur modellbaserad diagnos kan användas för att prediktera fel, riktades fokus mot Reflextruckens drivhjul och hur slitage på detta skulle kunna detekteras.

### 1.3.1 Val av metod

Efter att förundersökningen avslutats valdes modellbaserad diagnos, bestående av en modell på tillståndsform och hypotestest.

## Modellen

Modellen valdes att göras på tillståndsform därför att det var relativt enkelt att sätta upp fysikaliska samband som beskrev systemet. De parametrar som ingår i tillståndsekvationen är intuitiva och det är lätt att få en känsla för vad som händer då de modifieras.

## Hypotestest

BT är intresserade av att jämföra den lägsta nivån på drivmomentet och indikera då den passerat en kritisk gräns. Användandet av hypotestest är ett lämpligt val eftersom dessa bygger på principen att jämföra ett uppmätt värde från systemet med en tröskelnivå.

### 1.3.2 Metodens svagheter

Metoden som valts, att göra efterforskningar genom att tala med ett begränsat antal personer, blir naturligtvis bättre om fler personer blir tillfrågade om deras åsikt.

Vad gäller valet av drivhjulet, för att påvisa ett arbetssätt med modellbaserad diagnos, kan detta naturligtvis också ifrågasättas. Kanske hade det varit lämpligare att välja någon annan slitagedel för detta ändamål. Dock omfattar drivhjulet en väldigt grundläggande mekanik och lämpar sig därför väl som ett förklarande första steg för dem som vill vänja sig vid tankesättet kring modellbaserad diagnos.

Två studiebesök gjordes under examensarbetets inledande del. Dessa var väldigt lika varandra och kanske hade mer kunskap erhållits om de servicetekniker som besöktes hade arbetat på olika sätt. Kanske borde en kringresande servicetekniker besökts för att se hur de jobbar för att få en mer komplett uppfattning om hur BT jobbar med service på sina truckar.

Mätningar har bara gjorts på en enda truck. Kanske borde mätningar gjorts på flera olika typer av truckar för att se om liknande resultat kan erhållas på samtliga truckmodeller.

Modellen hade naturligtvis också kunnat konstruerats på andra sätt än på tillståndsform, exempelvis hade en parameterskattning kunnat göras.

## 1.4 Källkritik

Som referens för teorikapitlet har kurslitteraturen [11] använts genomgående. Kanske hade även annan litteratur kunnat användas, men boken ansågs innehålla den nödvändiga teorin. Denna bok i sig refererar till ett antal källor. Dock har inte dessa källor granskats.

I Litteraturförteckningen finns både litteratur som refererats till samt övrig litteratur som på något sätt använts. Denna litteratur utgörs till största delen av kurslitteratur i mekanik-, matematik- och reglerkurser och finns listade i litteraturförteckningen.

## 1.5 Valda avgränsningar

I en truck finns det självklart en massa olika delsystem till vilka ett fungerande diagnostiksystem skulle kunna göras. Men att göra ett helomfattande system på de 20 veckor som fanns tillgängliga är inte rimligt att tänka sig. Därför avgränsades examensarbetet enligt beskrivning i detta avsnitt.

### 1.5.1 Undersökningen

Efter åtta veckor hade tillräckligt många personer intervjuats att en uppfattning om vilken typ av diagnostik BT efterfrågade började bildas. Fler studiebesök och intervjuer hade naturligtvis kunnat göras. Tidsramarna tillät dock inte detta, då även ett konkret exempel på hur en tillämpning av ett diagnostiksystem kunde se ut, önskades.

### 1.5.2 Drivhjulet

Som ett exempel på hur ett diagnostiksystem kan konstrueras, valdes i samråd med BT truckens drivhjul. Detta dels för att tankarna sedan tidigare hade funnits kring olika lösningar beträffande drivhjulets slitage men även eftersom det verkade vara ett konkret och ganska överskådligt problem att börja med.

### 1.5.3 Momentvärden

De mätningar och jämförelser som gjorts, omfattar främst den lägsta nivån på momentet från motorn. Dock kommer även en del varvtalskurvor diskuteras om än inte i samma omfattning.

## 1.6 Disposition

Varje kapitel i denna rapport kommer att inledas med en liten kort sammanfattning av vad som tas upp i kapitlet. Detta för att ge läsaren en inblick i vad kapitlet kommer att handla om samt ge den ”översiktliga” läsaren en fingervisning om huruvida kapitlet är intressant för denne att läsa eller ej.

**Inledning**, förser läsaren med relevant bakgrund för uppgiften. Arbetets metod och avgränsningar beskrivs.

**Förundersökning**, beskriver den förundersökning som utgjorde arbetets första del. Här beskrivs de önskemål som finns inom de olika delbolagen inom BT samt deras synsätt på diagnostik. Kapitlet avslutas med att diskutera truckens olika slitagedelar.

**Teori**, innehåller den grundläggande teorin för diagnostiksystem, hur problem formuleras och beslut tas. Detta kapitel rekommenderas varmt

till läsaren som inte sedan tidigare har erfarenhet av diagnostiksystem. Här ges också motivering till vilka fördelarna är med modellbaserad diagnos.

**Modellkonstruktion**, behandlar steg för steg, från de grundläggande tankarna, modellens ingående komponenter och gjorda förenklingar, till en modell på tillståndsform med efterföljande felanalys.

**Verifiering**, utvärderar tidigare gjorda antaganden om momentkurvans utseende samt anknyter till den modell som konstruerades i Kapitel 4. Här presenteras även vald mätutrustning samt hur mätningarna genomfördes.

**Slutsatser**, innehåller en sammanfattning av resultatet samt lite diskussioner om framtida förbättringar och idéer.





# Kapitel 2

## Förundersökning

Detta kapitel beskriver det inledande arbetet av examensarbetet. Som ett första steg gjordes ett försök att utröna hur olika avdelningar inom BT ville att ett framtida diagnostiksystem skulle vara utformat.

### 2.1 Några uttalade önskemål

Inledningsvis gjordes en undersökning på BT om vilka tankar och idéer som fanns, samt vilka önskemål de olika avdelningarna hade. Ett flertal personer kontaktades och ombads att ge deras synsätt på diagnostik och vad de främst skulle vilja ha ut av examensarbetet. Nedan finns beskrivet lite kort om de olika avdelningarna, vad de gör och på vilket sätt de vill utnyttja diagnos i trucken.

#### 2.1.1 BT Products

BT Products är den avdelning som arbetar med att ta fram nya produkter, samt att vidareutveckla redan befintliga. Önskemålen här är att utifrån givare som redan finns på trucken, kunna göra ett diagnostiksystem som visar hur trucken mår i allmänhet. En så korrekt diagnos som möjligt skall även kunna ställas. En testmod liknande den som finns på Raymondtruckarna var också önskvärd. Testmoden ger serviceteknikern möjlighet att ”provköra” olika funktioner. Detta trots att dessa enligt de övergripande säkerhetsfunktionerna i styrsystemet borde vara spärrade för körning på grund av att ett fel uppstått. En sådan testmod skulle underlätta felsökningen för serviceteknikerna och på så vis kunna minska den totala tid som läggs ner på service.

#### 2.1.2 BT Svenska

BT Svenska är landets ledande leverantör av truckar och därtill kopplade tjänster som service, reservdelsförsörjning, finansiering och förarutbild-

ningar. De marknadsför truckar från BT, Toyota, DanTruck och SMV samt utför dessutom service på marknadens övriga märken. Här fanns intresset för ett system som kan prediktera fel och slitage på trucken för att på så sätt kunna göra serviceintervallen mer flexibla. En funktion som hjälper serviceteknikern att hitta felet är också önskvärd. I dagsläget presenteras en felkod som ofta innefattar en grupp av fel inom vilken det faktiska felet ligger. Genom att utnyttja sensorer och givare på trucken borde det gå att kombinera olika felgrupper för att på så sätt lättare isolera det faktiska felet samt åtgärda detta.

### 2.1.3 BT Europe

BT Europe är huvudserviceorganisation för alla säljbolag i Europa, som t ex BT Svenska. Här efterfrågades en snabbhet i servicen för att kunna korta ner tiden som en servicetekniker tillbringade vid varje truck. Rätt typ av service efterfrågades för att inte trucken skulle överservas. Även här önskades flexibla serviceintervall.

## 2.2 Studiebesök i Växjö

För att få en bättre känsla för hur BT:s servicetekniker jobbar, gjordes ett studiebesök på KF:s respektive ICA:s centrallager i Växjö.

Studiebesöket visade klart och tydligt att miljön har en stor inverkan på truckens livslängd. Slitna golv kan ge upphov till vibrationer i trucken och på så vis slita på den. Ostädade golv med emballage, sand, grus, spikar, flis från pall mm sliter hårt på t ex hjulen. Temperaturen, och framför allt temperaturväxlingar, kan sänka livslängden. Om trucken körs i en miljö där temperaturskillnaderna är stora, t ex i fryshus, bildas kondens som kan skada trucken i form av korrosion och intermittenta elfel. Förarnas sätt att köra har också en stor inverkan. En förare som kör med hastiga accelerationer och kraftiga inbromsningar sliter mer på trucken än en som kör lite lugnare.

Studiebesöket gav även en uppfattning om hur serviceteknikerna jobbar med servicen på sina truckar. De tekniker som besöktes hade hand om sin egen truckpark. Här hade de själva en god översikt över de truckar som fanns i parken samt när dessa kunde tänkas behöva service. Ett diagnostiksystem här kändes lite överflödigt då servicen på truckarna skedde med jämna intervall.

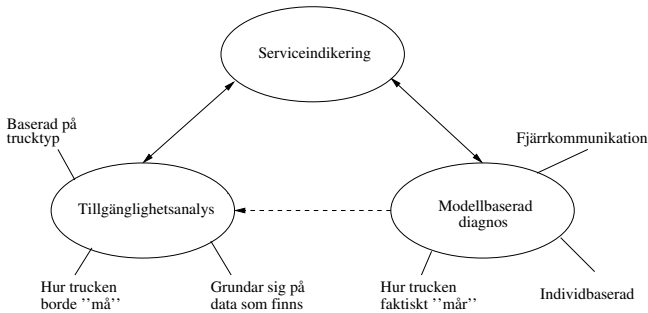
Däremot finns behovet av diagnostiksystem på de truckar som inte tillhör en stor truckpark. Där finns ingen stationerad tekniker, utan en tekniker kommer dit på anrop. Om det fanns ett diagnostiksystem som talade om när trucken börjar närma sig ett ”break down”, kunde en tekniker kallas dit innan trucken blir i akut behov av service. Systemet skulle även hjälpa till vid felsökningen då ett ”break down” har inträffat.

## 2.3 Olika synsätt på diagnostik

Som framgår av ovan finns det många vinklar att se på diagnos applicerat på BT:s truckar. Vissa är intresserade av att direkt kunna detektera att ett fel har uppstått, medan andra är mer intresserade av att prediktera den tidpunkt då ett fel *borde* uppstå.

Applikationen av dessa två typer av diagnos skiljer sig åt ganska markant. I det ena fallet, *modellbaserad diagnos*, används sensorer och mätningar för att avgöra om trucken fungerar som den förväntas göra. Används istället *tillgänglighetsanalys* är syftet att *förutsäga* hur länge trucken förväntas fungera under specifika förhållanden. Dessa förhållanden beror bland annat på miljöfaktorer, körsätt och truckens användningsområde.

För att skapa sig en kunskapsbas för tillgänglighetsanalys lämpar det sig att lagra de fel som indikeras av den modellbaserade diagnosen. På så sätt kan erfarenheter byggas upp vid varje indikerat fel. Lagras felindikeringarna från den modellbaserade diagnosen tillsammans med de omständigheter som rådde då felet inträffade, utgör detta senare en byggsten i ett bra beslutsunderlag då predikerande beslut behöver fattas. Ett försök att illustrera sambanden mellan de olika formerna av diagnos ses i Figur 2.1.



Figur 2.1: Olika synsätt på diagnos.

Efter att ha studerat vanliga felorsaker som uppkommer, hittades ett par parametrar som vore intressanta att observera. Nedan finns tankar kring dessa parametrar beskrivna under avsnitten *Modellbaserad diagnos* och *Tillgänglighetsanalys*.

### 2.3.1 Modellbaserad diagnos

Denna typ av diagnos, som direkt kan dra slutsatser utefter vad givare och sensorer säger, är den som är lättast att direkt börja tillämpa. Tankegången här är att använda det system av givare och sensorer som finns på trucken i dagsläget för att försöka dra slutsatser om truckens tillstånd.

Genom modellbaserad diagnos skulle det därför vara möjligt att kunna säga något om exempelvis slitage på hjul, olja, stativ etc. Nyckelkriteriet

är att det måste vara möjligt att mäta någon signal och sedan jämföra den med ett "normalt" beteende. Förslagsvis mäts ett flertal signaler för att kunna utesluta att en felaktig diagnos ställs.

### 2.3.2 Tillgänglighetsanalys

Ett uttalat önskemål på BT var att få ett system som på något sätt kan prediktera slitage på trucken och avgöra hur lång tid det är kvar tills den är i behov av nästa service. För att åstadkomma detta krävs mätningar och dokumentation på hur trucken används under lång tid. För att exempelvis kunna avgöra om en truck klarar ytterligare 1000 timmar i drift, borde det finnas statistik på hur en truck slits i liknande miljö och under liknande körsätt. I dagsläget finns inte dessa uppgifter att tillgå.

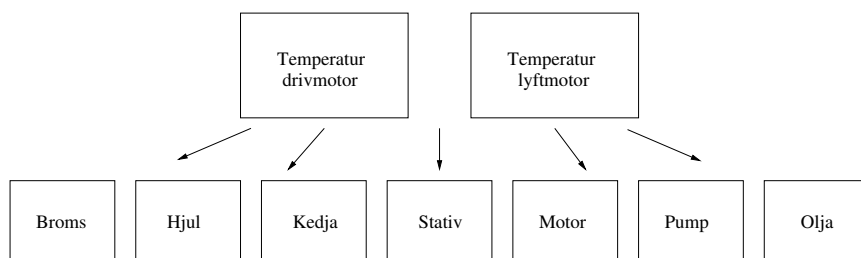
En annan aspekt som kan vara värd att beakta när det gäller tillgänglighetsanalys är den begränsning av minne och beräkningskapacitet som finns idag i BT:s truckar. Här vore det kanske mer lämpligt att trucken sänder data till en central enhet för lagring och behandling (Figur 2.2). Fördelen med detta vore att minneskapaciteten inte behöver byggas ut. Dessa tankegångar stämmer även väl överens med BT:s tidigare tankar och idéer.



**Figur 2.2:** Central lagring av truckinformation.

## 2.4 Truckens slitagedelar

Genom en undersökning av vilka delar som oftast går sönder under garantitiden på en truck hittades några intressanta delsystem, bl a hjulen. Efter kontakter med konstruktörer framkom ännu fler intressanta delar att titta på. Dessa ses i Figur 2.3. En tanke som funnits på BT var att bestämma hur trucken mår genom att mäta temperaturen på drivmotorn och lyftmotorn. Skulle detta kunna ge någon indikation på hur mycket trucken används och då även hur mycket den slits? Detta kan säkert stämma men då måste även hänsyn tas till andra faktorer. Några av dem diskuteras nedan.



Figur 2.3: Olika intressanta slitagedelar.

### Lastvikt-lasthöjd och antal lyft

Genom att titta på hur frekvent trucken lyfter olika laster kan en uppfattning fås om hur "hårt" den arbetar. Säg exempelvis att trucken ofta lyfter tungt och högt. Betyder det i sådana fall att stativ, lyftmotor, gafflar etc slits hårdare än om trucken hanterar laster på låga höjder?

### Start-stopp-acceleration-inbromsning

I vissa applikationer körs trucken under långa sträckor med eller utan last. Hur slits drivmotor, hjul, lager, växellåda etc vid sådan körning jämfört med om trucken körs korta sträckor? Kanske är det möjligt genom att lagra antalet start och stopp, samt information om hur trucken accelereras eller bromsas in, säga något om hur ofta trucken behöver service och anpassa serviceintervallen därefter?

### Miljöfaktor

Efter besöket i Växjö och samtalen med serviceteknikerna på plats väcktes tankar om hur miljön kring trucken påverkar dess livslängd. Ofta framförs truckarna i ganska smutsiga miljöer och stor risk finns att emballage fastnar på olika ställen. Snören som lindar upp sig kring hjulaxlar och bidrar till att trucken bromsas in, kartonger och dylika förpackningar som fastnar i utskjutningsvagnen och hindrar den i dess rörelse.

I fryshusmiljö utsätts trucken för kraftiga temperaturväxlingar som ger upphov till kondens. Detta gör att truckar som körs i fryshusmiljö kräver tätare service pga korrosion och elfel.

Dessa faktorer kan beaktas och vägas in i någon form av ”miljöfaktor” som bidrar till hur snabbt serviceräknaren räknas ner på trucken.

# Kapitel 3

## Teori

Detta kapitel kommer att behandla fördelen med att använda sig av modeller, samt lite av den teori som ligger till grund för konstruktion av hypotestest-en. Kan hoppas över av läsare som är väl insatta i ämnet.

### 3.1 Varför modeller?

En modell av ett system kan beskrivas som ett verktyg som används för att besvara frågor om systemet utan att behöva genomföra experiment. Det kan i vissa fall vara omöjligt eller livsfarligt att utföra experiment, t ex ett krocktest av en bil, eller en härdsvälta i ett kärnkraftverk. Då kan istället modellen användas för att beräkna eller bestämma hur systemet skulle ha uppfört sig. Detta kan ske analytiskt, genom att lösa matematiska ekvationer som beskriver systemet, eller genom simulering, dvs numeriska experiment på modellen. Modellkonstruktionen delas in i två grundprinciper, *Fysikaliskt modellbygge* och *Identifiering*.

#### **Fysikaliskt modellbygge**

Vid konstruktion av en fysikalisk modell, återförs systemets egenskaper på delsystem. Dessa delsystem har ett uppförande som är känt. Detta innebär t ex för tekniska system att naturlagar som beskriver delsystemen används.

#### **Identifiering**

Den andra grundprincipen går ut på att använda observationer från systemet för att anpassa modellens egenskaper till systemets egenskaper.

Varför ska man då använda sig av modeller i diagnossammanhang? I Kapitel 1, [9] kan denna förklaring läsas:

*Modellbaserad diagnos och feldetektering. I många tekniska system finns ett behov att automatiskt upptäcka fel, slå larm och eventuellt också*

peka ut var felet sitter. Om man har en bra modell av t. ex. en bilmotor, så kommer normalt de mätningar som görs under en körning att stämma väl med vad modellen säger att de borde vara. Om man plötsligt finner att överensstämmelsen inte längre är god är det naturligt att misstänka att ett fel inträffat. Genom att undersöka vilka variabler eller variabelkombinationer som stämmer eller inte stämmer med modellen kan det vara möjligt att peka ut var felet sannolikt finns.

## 3.2 Felisolering genom hypotestest

All teori i avsnittet nedan är hämtat ur [11]. Den som vill läsa mer om hypotestest och diagnostik i allmänhet, kan med fördel läsa denna bok.

Den grundläggande idén är att kombinera en grupp av olika hypotestest och med hjälp av dessa lösa komplicerade diagnostikproblem. Genom att använda modeller kan mängder av fel och deras inverkan på det riktiga systemet studeras i diagnostiksystemet.

### 3.2.1 Felmoder

För att konstruera ett modellbaserat diagnostiksystem behövs en modell av systemet. Modellen bygger på t ex differentialekvationer, algebraiska ekvationer och ibland också stokastiska delar. Modellen måste innehålla egenskaperna för systemet i det felfria fallet, men måste även innehålla definitioner på ett flertal fel och hur dessa påverkar systemet. Felen delas in i sk felmoder.

#### Exempel

Studera ett system som består av en gastank med en potentiell läcka. Tanken är också utrustad med en trycksensor. Låt alla läckor, oavsett hur stora de är, tillhöra samma felmod ”läcka”. Låt alla fel på trycksensorn tillhöra felmod ”fel på trycksensor”. Vidare så är ”inget fel” också en felmod. Då fås en lista över felmoderna enl:

Felmod	
IF	”inget fel”
FTS	”fel på trycksensor”
L	”läcka”
FTS&L	”fel på trycksensor” och ”läcka”

Man skiljer mellan enkelfel: FTS eller L och multippelfel: FTS&L. Gruppen av fel benämns  $\Omega = \{IF, FTS, L, FTS\&L\}$ . En regel är att bara en felmod kan vara gällande i systemet under ett och samma tillfälle.



### 3.2.2 Felisolering genom strukturerade hypotestest

I en grupp av observationer är det diagnostiksystemets uppgift att generera ett diagnosbeslut  $S$ , vilket innehåller information om vilken felmod som kan förklara observationerna.

Modellbaserad diagnos är ett komplext problem och därför är det bra att dela upp problemet i mindre delproblem. Figur 3.1 visar hur ett diagnostiksystem är uppbyggt då strukturerade hypotestest används. Insignalerna till diagnostiksystemet är systemets insignal  $u$  och systemets utsignal  $y$ . Signalen  $d$  representerar indata som är okända för diagnostiksystemet, t ex störningar. Utdata från diagnostiksystemet är diagnosbeslutet  $S$ , vilket innehåller information om vilken felmod som kan förklara uppförandet i systemet.

Hela diagnostiksystemet  $\delta(x)$  delas upp i mindre delar  $\delta_n(x)$ , vilka antas vara hypotestest. Testen antas vidare vara "binära" i den mening att resultatet från testet är *ett* av två möjliga beslut.

Varje hypotestest  $\delta_n(x)$  genererar ett del-diagnosbeslut  $S_n$ , dvs  $S_n = \delta_n(x)$ . Syftet med beslutslogiken är då att kombinera informationen från del-diagnosbesluten för att skapa ett diagnosbeslut  $S$ .

$S$  kan innehålla fler än en felmod.  $S = \{F1, F2\}$  betyder att både felmod  $F1$  och felmod  $F2$  kan förklara uppförandet hos systemet. Denna egenskap hos  $S$  motsvarar på ett bra sätt den önskade funktionaliteten, eftersom i de fall då det är svårt eller rent av omöjligt att avgöra vilken felmod som inträffat, är det väldigt bra om serviceteknikern får veta att det finns flera olika felmoder som kan förklara systemets uppförande. Om diagnostiksystemet tvingas att välja en av felmoderna är risken för att välja fel felmod stor.

Nollhypotesen  $H_n^0$  för det  $n$ :te hypotestestet är att felmoden som existerar i systemet tillhör en specifik grupp av felmoder,  $M_n$ . Felmoderna i  $M_n$  motsvarar de icke-övervakade felen. Den alternativa hypotesen är att den existerande felmoden inte tillhör  $M_n$ . Detta innebär att det måste tillhöra  $M_n^C$ , dvs komplementet till  $M_n$ . På detta vis bidrar varje hypotestest med lite information om vilken felmod som existerar i systemet.

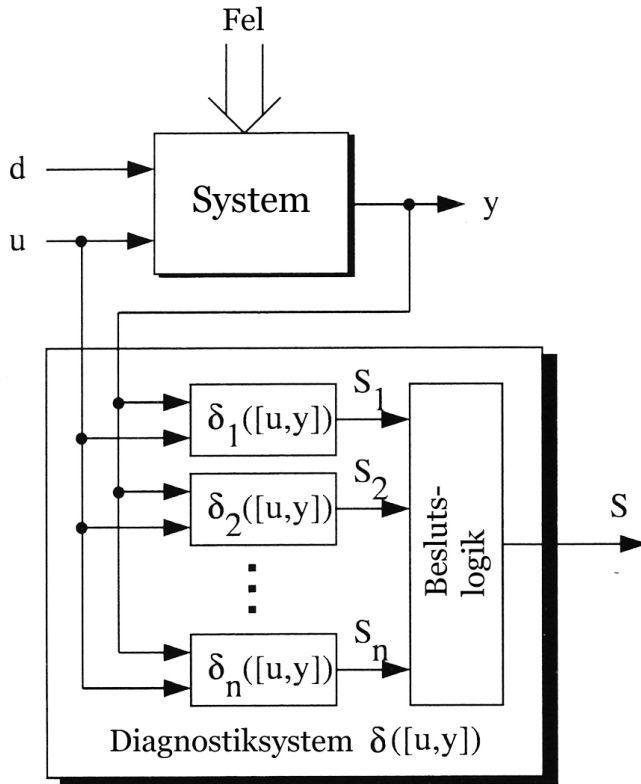
Låt  $F_p$  vara felmoden som uppträder i systemet. Då är det möjligt att för den  $n$ :te nollhypotesen och dess alternativa hypotes skriva:

$$\begin{aligned} H_n^0 : F_p \in M_n \text{ någon felmod i } M_n \text{ kan förklara uppmätta data} \\ H_n^1 : F_p \in M_n^C \text{ ingen felmod i } M_n \text{ kan förklara uppmätta data} \end{aligned}$$

För de två möjliga besluten från ett hypotestest  $\delta_n$  kan man använda notationen  $S_n^0$  och  $S_n^1$ . Detta betyder att:

$$S_n = \begin{cases} S_n^1 = M_n^C \text{ om } H_n^0 \text{ förkastas (} H_n^1 \text{ accepteras)} \\ S_n^0 \subseteq \Omega \text{ om } H_n^0 \text{ inte förkastas} \end{cases}$$

När  $H_n^0$  förkastas, kan det antas att  $H_n^1$  är sann. Detta innebär att felmoden



**Figur 3.1:** Ett diagnosystem som använder principen strukturerad hypotestest.

*inte* kan tillhöra  $M_n$  och därför måste  $S_n^1 = M_n^C$ . Vidare, om  $H_n^0$  *inte* förkastas kan man *inte* anta någonting. Dock gäller alltid att  $M_n \subseteq S_n^0 \subseteq \Omega$ .

Hur hypotestest används för att diagnostisera och isolera fel visas med följande exempel:

### Exempel

Antag att  $\Omega = \{F_1, F_2, F_3\}$  och att diagnostiksystemet innehåller följande grupper med tre hypotestest:

$$\begin{aligned} H_1^0 : F_p \in M_1 = \{NF, F_1\} \quad S_1^0 &= \Omega \\ H_1^1 : F_p \in M_1^C = \{F_2, F_3\} \quad S_1^1 &= \{F_2, F_3\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_2^0 : F_p \in M_2 = \{NF, F_2\} \quad S_2^0 &= \Omega \\ H_2^1 : F_p \in M_2^C = \{F_1, F_3\} \quad S_2^1 &= \{F_1, F_3\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_3^0 : F_p \in M_3 = \{NF, F_3\} \quad S_3^0 &= \Omega \\ H_3^1 : F_p \in M_3^C = \{F_1, F_2\} \quad S_3^1 &= \{F_1, F_2\} \end{aligned}$$

Om bara  $H_1^0$  förkastas kan man dra slutsatsen att  $F_p \in S_1^1$ ,  $F_p \in S_2^0$ ,  $F_p \in S_3^0$ , dvs  $F_p \in S_1^1 \cap S_2^0 \cap S_3^0 = \{F_2, F_3\} \cap \Omega \cap \Omega = \{F_2, F_3\}$ , dvs felmoden är endera  $F_2$  eller  $F_3$ . Om både  $H_1^0$  och  $H_2^0$  förkastas kan man dra slutsatsen att  $F_p \in \{F_2, F_3\} \cap \{F_1, F_3\} \cap \Omega = \{F_3\}$ , dvs felmoden är  $F_3$ .

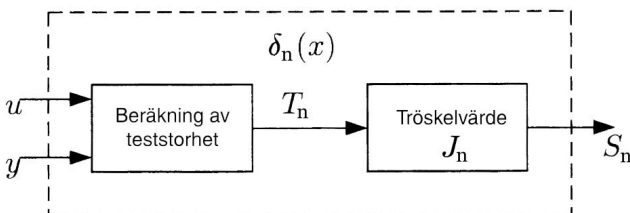
### 3.2.3 Hypotestest

För varje hypotestest  $\delta_n$  måste ett förkastningsområde hittas. Detta görs vanligen med ett sk teststorhet som är en skalär funktion  $T_n(\mathbf{x})$  av uppmätta data  $\mathbf{x}$  som ska jämföras med ett tröskelvärde  $J_n$ . Vanligen om  $T_n(\mathbf{x}) \geq J_n$  så förkastas  $H_n^0$ .

När observationerna delas upp i insignaler  $u(t)$  och utsignaler  $y(t)$ , fås mätdata för varje hypotes enligt:

$$\mathbf{x}(t) = \begin{pmatrix} u(t-N) & u(t-N+1) & \dots & u(t) \\ y(t-N) & y(t-N+1) & \dots & y(t) \end{pmatrix}$$

Funktionen  $T_n(\mathbf{x})$  jämförs mot tröskelvärdet  $J_n$ . Då fås en struktur på  $\delta_n$  enligt Figur 3.2.



Figur 3.2: Hypotestest  $\delta_n(\mathbf{x})$

Antag att  $T_n(\mathbf{x})$  väljs så att nollhypotesen förkastas när  $T_n(\mathbf{x})$  överstiger ett tröskelvärde. Hypotestestet  $\delta_n$  kan då definieras enligt:

$$S_n = \delta_n(\mathbf{x}) = \begin{cases} S_n^1 & \text{om } T_n(\mathbf{x}) \geq J_n \\ S_n^0 & \text{om } T_n(\mathbf{x}) \leq J_n \end{cases}$$

### 3.2.4 Influensstruktur och Beslutsstruktur

Influensstruktur beskriver hur feLEN idealt påverkar teststorheterna. Med idealt menas att systemet uppför sig exakt som modellen, dvs det finns inga omodellerade störningar eller mätbrus. Beslutsstruktur beskriver hur ”felbeslutet” beror på tröskelvärdena.

#### Influensstruktur

En influensstruktur är en tabell som innehåller 0, 1 eller X, där X står för *don't care*. Ett exempel på hur en sådan tabell kan se ut är:

	IF	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>
T <sub>1</sub> ( <b>x</b> )	0	0	1	0
T <sub>2</sub> ( <b>x</b> )	0	0	1	1
T <sub>3</sub> ( <b>x</b> )	0	X	0	1

En 0 i n:te raden och j:te kolumnen betyder att om en felmod existerar i systemet så kommer inte teststorheten  $T_n(\mathbf{x})$  att påverkas. En 1:a i n:te raden och j:te kolumnen betyder att alla fel som tillhör felmoden kommer att påverka teststorheten  $T_n(\mathbf{x})$ . Ett X betyder att några men inte alla fel i felmoden kommer under vissa förhållanden att påverka teststorheten  $T_n(\mathbf{x})$ . Influensstrukturen konstrueras genom att studera ekvationerna som beskriver modellen och hur teststorheterna  $T_n(\mathbf{x})$  beräknas.

#### Beslutsstruktur

I praktiken måste kraven släppas på de ideala villkoren och istället används tröskelvärden, sk hypotestest. Genom att göra detta får man en beslutsstruktur. Detta medför de grundläggande antagandena att när  $H_n^0$  förkastas så håller  $H_n^1$ . Det svåra är att välja en lämplig tröskelnivå. För att uppnå någorlunda bra antaganden måste de flesta 1:or i tabellen bytas ut till X, eftersom det inte med säkerhet går att säga ifall alla fel indikeras, beroende på hur tröskelnivån väljs. Ett exempel på hur tabellen för beslutsstruktur kan se ut:

	IF	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>
$\delta_1(\mathbf{x})$	0	0	X	0
$\delta_2(\mathbf{x})$	0	0	X	1
$\delta_3(\mathbf{x})$	0	X	0	X

Eftersom strukturen relaterar till hela hypotestestet används  $\delta_n(\mathbf{x})$  i stället för  $T_n(\mathbf{x})$ .

# Kapitel 4

## Modellkonstruktion

Detta kapitel beskriver hur modellen är konstruerad samt vilka förenklingar och antaganden som är gjorda. De hypotestest används vid diagnostiseringen av drivhjulet presenteras och motiveras.

Läsaren kommer först att få ta del av de tankar som låg till grund för modelleringen, varefter systemets ingående komponenter redovisas. Förenklingar presenteras därefter och motiveras. Då kännedom finns om systemet och dess ingående komponenter arbetas en tillståndsform fram på formen av en differentialekvation, varefter parametrar som kan tänkas påverka systemet analyseras och kommenteras. Avslutningsvis diskuteras modellens begränsningar och hypotestest för detektering av förändring i momentkurvan sätts upp.

### 4.1 Grundläggande tankar

Hjulslitaget som ska detekteras kan uppkomma på ett antal olika sätt. Det kan handla om t ex sprickbildningar i däckmaterialet, att slitytan på hjulet nöts ner eller att bitar av hjulet lossnar och trillar bort. Då det visat sig att dessa tre är de största orsakerna till att drivhjulen går sönder valdes just nedslitningen av drivhjulet för vidare undersökning.

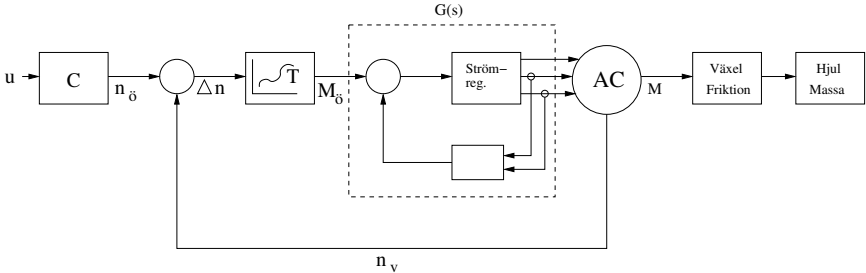
För att kunna detektera att ett hjul är slitet, i den bemärkelsen att hjuldiametern minskat, vore det teoretiskt möjligt att titta på det motormoment som går åt för att driva trucken framåt. Om hjulets diameter minskat borde även drivmomentet minska med tanke på hävarmseffekten. Kunde således något utläsas av detta moment som funktion av tiden vore det möjligt att avgöra om ett hjul var i behov av byte eller inte.

För att kunna säga något om momentet bör detta observeras vid något tillfälle då det kan förväntas ligga på en specifik nivå. Det bästa, och kanske enklaste, är att observera momentet då trucken körs med konstant hastighet. För att åstadkomma en konstant hastighet är det smidigaste sättet att trucken först accelereras upp till topphastigheten som sedan bibehålls. Momentkurvan borde då plana ut och ligga på en konstant, lätt mätbar

nivå.

## 4.2 Modellering av truckens drivlina

Med utgång från ovanstående tankar konstruerades en modell över truckens drivlina (Figur 4.1).



Figur 4.1: Blockschemamodell av truckens drivlina.

### 4.2.1 Modellkomponenter

Modellen i Figur 4.1 består av ett antal komponenter: C-blocket, T-blocket, Motorstyrning, AC-motor och växellåda. Komponenterna beskrivs nedan.

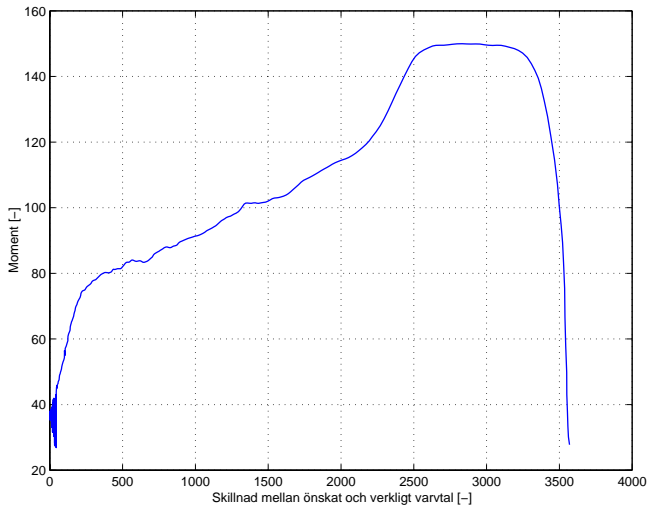
#### C-blocket

Detta block representerar översättningen från potentiometerutslaget på gasreglaget till önskat varvtal  $n_\delta$ . I verkligheten sker denna översättning i truckens styrprogram.

#### T-blocket

T-blocket representerar en uppslagstabell, skapad från en av mätserierna, där ett varvtal  $\Delta n$  översätts till ett önskat moment  $M_\delta$ . I verkligheten görs denna översättning i truckens motorstyrning. Denna lösning var nödvändig då inga exakta uppgifter om motorstyrningens funktion fanns att tillgå, dock är det känt att den arbetar efter just detta arbetssätt. Uppslagstabellen ses plottad i Figur 4.2.

Det rippel som observeras nära  $\Delta n = 0$  uppkommer eftersom vektorn innehållande momentvärdena har sorterats. Görs inte denna sortering fungerar inte MatLabs funktion "look-up-table" eftersom den, med en osorterad momentvektor, kan översätta en liten varvtalsskillnad till ett flertal olika momentvärden.



**Figur 4.2:** Moment plottat mot varvtalsskillnaden  $\Delta n$  mellan uppmätt och önskat varvtal

## Motorstyrning

Området i Figur 4.1 omgivet av den streckade fyrkanten representerar en del av truckens motorstyrning. Om denna finns väldigt lite information tillgänglig och har därför orsakat problem vid modelleringen. En vidare diskussion förs i avsnitt 4.2.2 om vilka antaganden som gjorts om motorstyrningen.

## AC-Motor

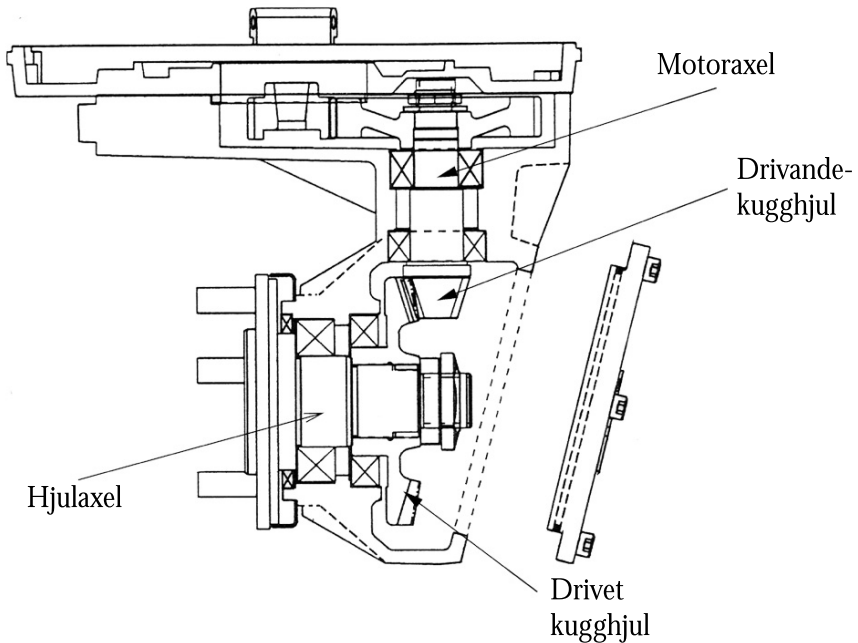
Truckens motor är en AC motor på 48V/5kW (TSP112/4-150-T). Ingen vidare analys av motorn har gjorts utan nämns bara här i dokumentations-syfte.

## Växellåda och friktion

Truckens växellåda (Figur 4.3) är en kugghjulsväxel av enkel modell. Utväxlingsförhållandet för växellådan är 20.89:1.

## Hjul och massa

Detta block ska representera kopplingen mellan den hjuldiameter som föreligger och det moment som krävs för att driva truckens massa i färdriktningen.



Figur 4.3: Ritning av truckens växellåda.

## 4.2.2 Gjorda förenklingar

Under skapandet av modellen gjordes vissa förenklingar som var nödvändiga för att komma vidare.

### Motorstyrning

I avsnitt 4.2.1 nämndes att en del av motorstyrningen representeras av en uppslagstabell. Övriga delar av motorstyrningen är kända i det avseendet att funktionaliteten i huvuddrag är känd, dock finns inga matematiska samband eller andra detaljer specificerade.

Motorstyrningen fungerar i huvudsak så att den får ett önskat varvtal  $n_{\delta}$  från föraren. Detta varvtal görs om till ett önskat moment  $M_{\delta}$  som bör läggas ut från AC-motorn. Momentet i sig genereras av en strömregulator som matar motorn med erforderlig strömstyrka för det önskade momentet. Dock återkopplas denna ström hårdvarumässigt för att reglera strömmatningen till AC-motorn. Det är denna återkoppling som är okänd.

För att kunna fortsätta antas att motorstyrningen är snabb i sin reglering av momentet och att den således får motorn att generera ett moment  $M$  ut till växellådan sådant att  $M \approx M_{\delta}$ , dvs motorstyrningens överföringsfunktion  $G(s) \approx 1$ . Detta antagande kan anses rimligt då motorn får förväntas generera ungefär det moment som begärs av den så länge inte ett



moment som överskrider motorns kapacitet begärs.

### Växellåda

Växellådans totala tröghetsmoment  $J$  samt dess friktion  $b$  är okända. Störst friktion fås när växellådsoljan är kall. Huvuddelarna av denna friktion försvinner efter 15-20 minuters körning enligt erfarenheter från BT:s konstruktörer. Under mätningarna togs hänsyn till denna effekt. Friktionen  $b$  kommer sig i huvudsak av de så kallade skvalpeffekter som uppstår då växellådsoljan vispas omkring i växellådan under körning. Denna friktion varierar med växellådans varvtal, vilket försummas och istället en konstant friktion antagits. Vidare skattas värdet på  $b$  då detta inte är känt varken från BT eller tillverkaren av växellådan.

### Slip

Då hjulet driver trucken framåt uppstår en viss ”glidning” mellan hjulet och golvet, ett så kallat ”slip”. I modelleringen har inte hänsyn tagits till detta eftersom effekterna av det borde vara så pass små att de inte ger någon inverkan på det resultat som eftersöks.

### Luftmotstånd

Likaså luftmotståndet har försummas. Den aktuella trucken har en topphastighet på ca 12 km/h vilket inte borde innebära något luftmotstånd att tala om. Under samma tidsperiod som detta examensarbete utfördes gjordes ett annat examensarbete på samma truckmodell [5]. Även i detta försummas luftmotståndet, där med gott resultat.

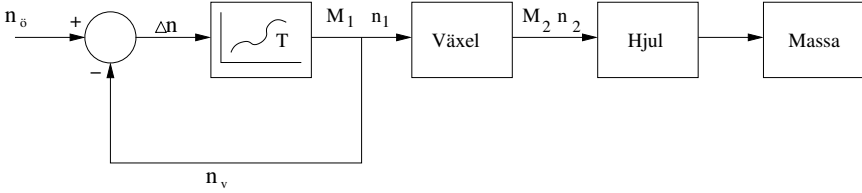
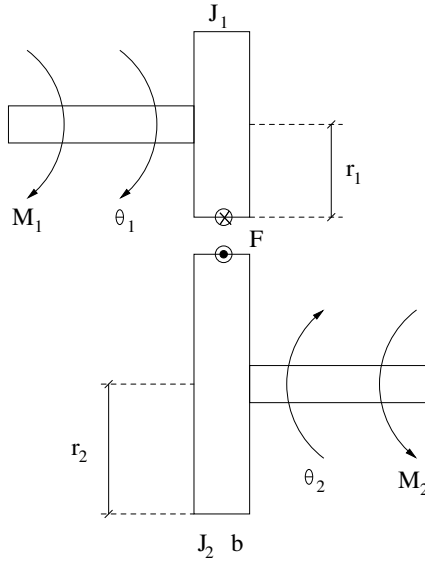
### Körning på plant underlag

Då en truck vanligen framförs på plant underlag utgår modelleringen från detta.

## 4.3 En tillståndsmodell

För att kunna simulera drivlinan i Matlab konstrueras en tillståndsbeskrivning i form av differentialekvationer för modellen. Betrakta den förenklade modellen av drivlinan i Figur 4.4. Vetskap finns redan om hur varvtal och momentåterkopplingen fungerar (T-blocket) och vad som återstår är att modellera dynamiken genom växellådan, truckens drivhjul och truckens massa. Genom att studera principskissen av växellådan i Figur 4.5 sätts följande ekvationer upp med hjälp av Newtons momentlagar

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\theta}_1(t) = M_1(t) - r_1 F(t) \\ J_2 \ddot{\theta}_2(t) = r_2 F(t) - M_2(t) - b \dot{\theta}_2(t) \end{cases}$$


**Figur 4.4:** Förenklad modell av truckens drivlina.

**Figur 4.5:** Principskiss av truckens växellåda.

Genom att utnyttja att

$$\ddot{\theta}_2(t) = \frac{1}{r} \cdot \ddot{\theta}_1(t)$$

och bryta ut  $F(t)$  ur båda ekvationerna som därmed kan sättas lika, fås efter lite räknande

$$(J_1 r^2 + J_2) \cdot \ddot{\theta}_2(t) = r M_1(t) - M_2(t) - b \dot{\theta}_2(t) \quad (4.1)$$

där

$$r = \frac{r_2}{r_1}$$

Genom att titta på Figur 4.4 konstateras att det är momentet  $M_2$  som driver trucken framåt. Vidare är truckens hastighet direkt kopplad till vinkelhastigheten  $\dot{\theta}_2$ . Om det antas att kraften  $F_T$  är den kraft som driver trucken framåt kan denna tecknas

$$F_T = \frac{2M_2}{d} \quad (4.2)$$

där  $d$  är diametern på drivhjulet. Har trucken sedan rört sig sträckan  $x$  kan  $F_T$  även tecknas som

$$F_T = m_T \ddot{x} \quad (4.3)$$

där  $m_T$  är truckens totala massa. Slutligen kan den sträcka  $x$  trucken färdas uttryckas i  $\theta_2$  som

$$x = \frac{d\theta_2}{2} \Rightarrow \ddot{x} = \frac{d\ddot{\theta}_2}{2} \quad (4.4)$$

Genom att kombinera ekvationerna (4.2), (4.3) och (4.4) kan  $M_2$  tecknas som

$$M_2 = \frac{m_T d^2}{4} \cdot \ddot{\theta}_2(t) \quad (4.5)$$

Förekomster av  $M_2$  ersätts härmed eftersom det är  $M_1$  som återkopplas och slås upp i uppslagstabellen. Alla ekvationer finns nu för att sätta upp systemet på tillståndsform. Genom att sätta in ekvation (4.5) i (4.1) samt substituera  $J_1 r^2 + J_2$  med  $J$  fås

$$\ddot{\theta}_2(t) = \frac{rM_1(t) - b\dot{\theta}_2(t)}{J + \frac{m_T d^2}{4}} \quad (4.6)$$

Resultatet, bestående av ekvation (4.6) används nu för att konstruera en Simulinkmodell i Matlab (Bilaga A). Denna modell används sedan för att testa vad en ändring i de olika ingående parametrarna får för effekt på modellens utsignal.

## 4.4 Analys av tänkbara felparametrar

För att kunna konstatera huruvida truckens hjul är slitet ( $d$  har minskat) görs ett antal variationer i olika parametrar för att se hur detta påverkar den momentkurva modellen ger.

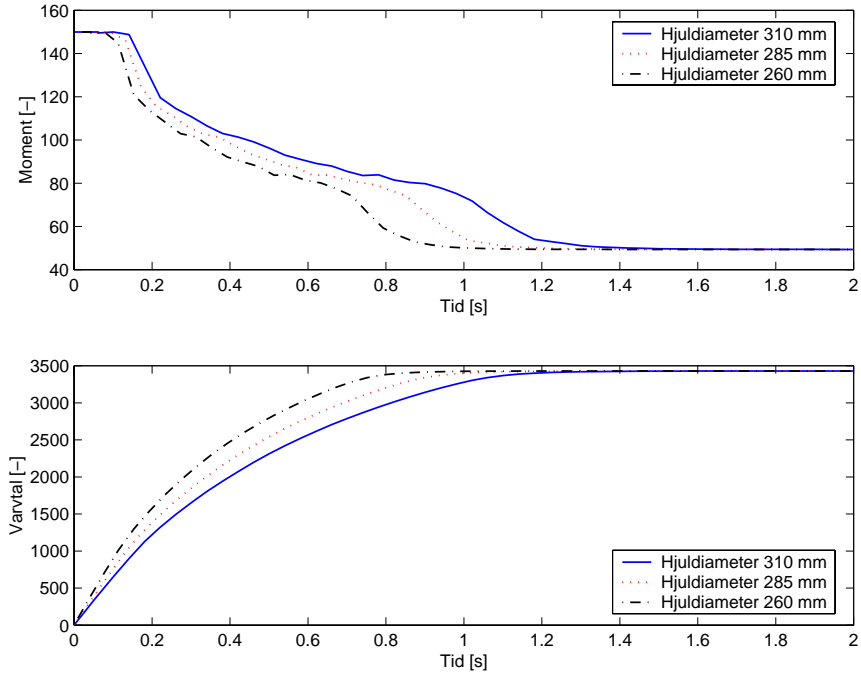
Vid identifiering av tänkbara felparametrar beaktades uttrycket (4.6). Här ses vilka parametrar som kan ha påverkan på modellen. De tre parametrar som är av intresse, samt deras påverkan på momentkurvan presenteras nedan.

Modellen har en väldigt kort accelerationstid från stillastående till topphastighet samt att momentnivån vid konstant hastighet verkar ligga på samma nivå hur än modellens ingående parametrar förutom friktionen ändras.

### 4.4.1 Hjuldiameter

Genom att förändra hjuldiametern (Figur 4.6) i modellen undersöktes vad detta gav för förändringar på modellens utsignaler. En minskning av hjuldiametern gjorde att trucken snabbare nådde sitt maxvarvtal. Det kan förväntas eftersom hävarmen från hjulets centrum krymper och då krävs ett lägre moment för att driva runt hjulet. Däremot borde hastigheten relativt

omgivningen på trucken vara lägre med en mindre hjuldiameter. ”Knät” på momentkurvan förskjöts åt vänster vilket även detta tyder på att trucken når sitt maxvarvtal tidigare vid minskning av hjuldiametern. Däremot

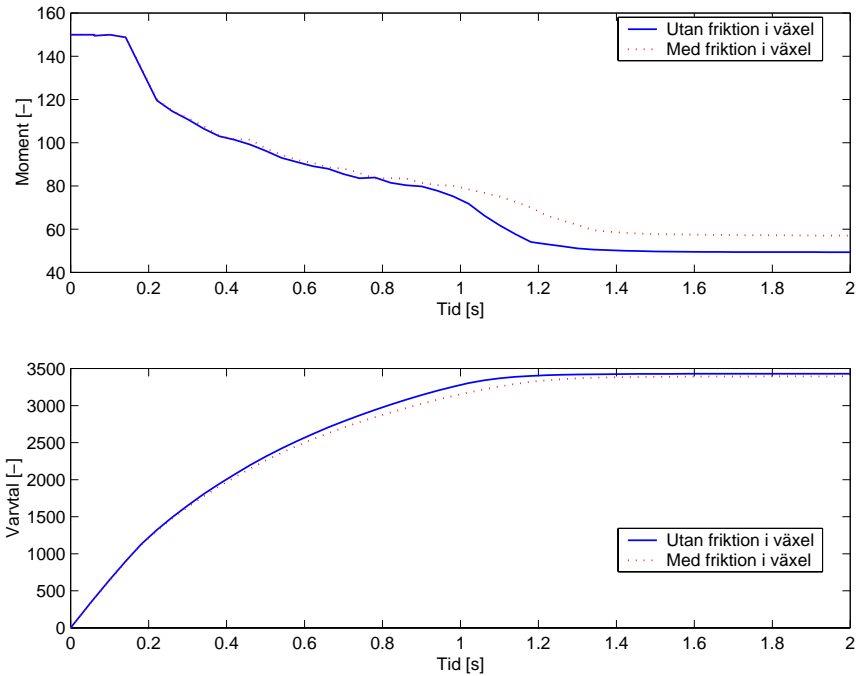


**Figur 4.6:** Förändringar i modellens utsignaler vid variation av hjuldiametern  $d$ .

fås inte den förväntade sänkningen av momentets lägsta nivå som förutspåts. Detta beror antagligen på de begränsningar modellen har och som diskuteras vidare i avsnitt 4.5.

#### 4.4.2 Friktion i växellåda

Ökad friktion i växellådan (Figur 4.7) gör så att trucken tar längre tid på sig att nå maxvarvtal. Det finns olika tänkbara anledningar till en ökad friktion i växellådan, t ex kan det bero på att temperaturen på oljan i växeln inte har nått sin ”arbetstemperatur”, utan är mer trögflytande. Det kan vara slitage på själva växeln som gör att den inte fungerar som den ska. Det skulle också kunna bero på läckage, eller att främmande vätska trängt in i systemet. Här observeras även den höjning av momentet som förutsagts tidigare.



**Figur 4.7:** Förändringar i modellens ut signaler vid variation av friktionen  $b$

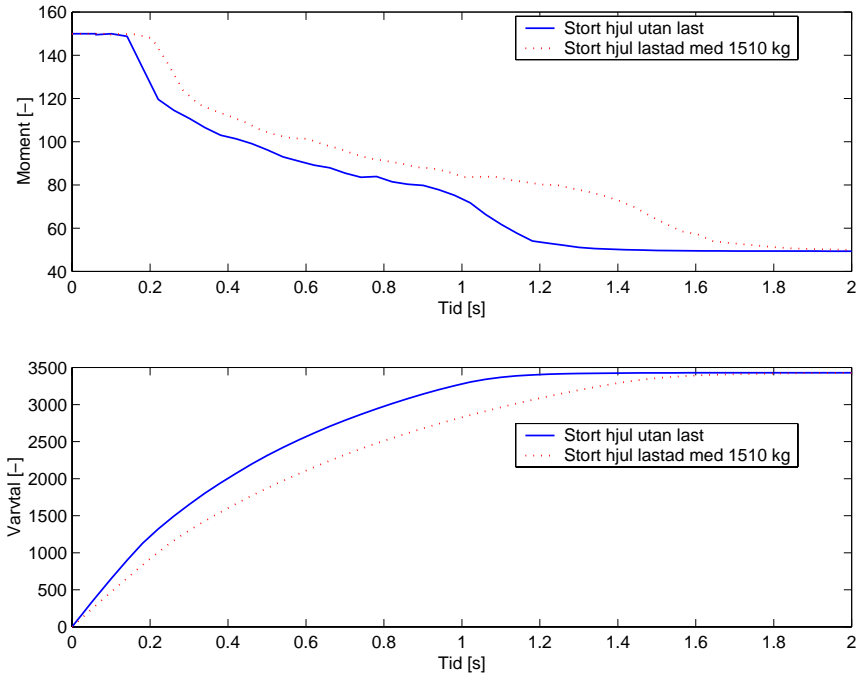
### 4.4.3 Lastvikt

En ökad last på trucken ger även detta konsekvensen att trucken tar längre tid på sig att accelerera till topphastighet. Detta åskådliggörs tydligt av både momentkurva och varvtalskurva i Figur 4.8. Inte heller här syns den förväntade skillnaden i lägsta nivån på drivmomentet.

## 4.5 Begränsningar i modellen

Som det framgick i föregående stycke lever inte modellen upp till förväntningarna i flera avseenden. Tidsaspekten stämmer inte och inte heller den förväntade nivåskillnaden på momentet kunde observeras. Detta beror främst på modelleringen av motorstyrningen samt okända parametrar.

Modellen baserar sig på en mätning som valts att användas som referens (se avsnitt 4.2.1) och är konstruerad så att den jämför det begärda varvtalet med det varvtal trucken faktiskt håller vid en given tidpunkt. Denna varvtalsskillnad slås upp i uppslagstabellen (Figur 4.2) och momentet som motsvarar varvtalsskillnaden läggs ut. Detta får som följd att samma moment alltid kommer läggas ut då varvtalsskillnaden är noll (dvs trucken har nått upp till den, av föraren, önskade hastigheten).



**Figur 4.8:** Förändringar i modellens utsignaler vid variation truckens vikt  $m_T$ .

I Kapitel 5 kommer mätningar som gjorts på truck att redovisas och diskuteras. Här kommer bland annat den momentskillnad som vi förutspådde i stycke 4.1 att visa sig. Anledningen att detta nämns här är för att inte förvirra läsaren vid läsning av resterande stycken i detta kapitel.

## 4.6 Konstruktion av hypotestest

Nu när kännedom finns om hur systemet uppför sig skapas hypotestest för att kunna avgöra huruvida drivhjulet är slitet eller inte.

### 4.6.1 Beslutsstruktur

Som beskrivet ovan finns det fler saker än just hjuldiametern som ändrar utseendet på momentkurvan och därför måste det avgöras vilket förhållande som råder innan det kan konstateras att en förändring i momentkurvan betyder just att drivhjulet är slitet. För att strukturera upp problemet sätts beslutsstrukturen i Tabell 4.1 upp där  $F_1$  indikerar hjulslitage,  $F_2$  friktion i växellådan och  $F_3$  indikerar att trucken är lastad. Hypotestesten  $\delta_i(\mathbf{x})$ ,  $i = 1, 2, 3$  kommer alltså att kunna användas för att med en viss säkerhet säga något om hjulslitage. Ett hjulslitage är aktuellt om  $\delta_1(\mathbf{x})$

**Tabell 4.1:** Beslutsstruktur för hjulslitage.

	$F_1$	$F_2$	$F_3$
$\delta_1(\mathbf{x})$	X	X	X
$\delta_2(\mathbf{x})$	0	X	0
$\delta_3(\mathbf{x})$	0	0	1

ligger över något tröskelvärde samtidigt som  $\delta_2(\mathbf{x})$  och  $\delta_3(\mathbf{x})$  ligger under sina tröskelvärden.

$\delta_1(\mathbf{x})$  representeras av en kännbar förändring av momentnivån under körning. Testet  $\delta_2(\mathbf{x})$ , som reagerar på onormal friktion i växellådan, är kanske det test som är svårast att konstruera då onormal friktion kan bero på många faktorer. Den faktor som märks i det vardagliga användandet är dock effekter orsakade av att växellådsoljan inte har nått sin arbetstemperatur. Erfarenheter hos konstruktörerna på BT är dock att dessa effekter avtar efter ca 15-20 minuters körning, vilket gör att detta kunde vara en initial approximation för testet  $\delta_2(\mathbf{x})$ . Värt att observera i ovanstående resonemang är att testen ovan idag inte existerar i någon egentlig mening.

Vad gäller  $\delta_3(\mathbf{x})$ , som indikerar om trucken är lastad eller inte, finns inte heller detta test i dagsläget. Dock befinner sig BT inför ett kommande generationsskifte av sina truckar där troligtvis en sådan givare kommer finnas tillgänglig.





# Kapitel 5

## Verifiering

I detta kapitel verifieras tidigare antaganden om drivmotorns momentkurvas uppförande genom mätningar på truck. Jämförelser med modellen från Kapitel 4 kommer också att göras. Val av mätutrustning presenteras och mätresultat analyseras med avseende på olika felkällor.

### 5.1 Mätningar

Flera olika mätserier gjordes (Bilaga B). Mätningarna utfördes vid variationer i storlek på drivhjulet, olika temperaturer på växellådan samt med olika lastvikter.

Anledningen till att mätningar utfördes vid olika temperaturer på växellådan var att denna verkade ha en effekt på drivmomentet från motorn likt den som eftersöktes.

#### 5.1.1 Mätutrustning

Till mätningarna användes två uppsättningar av mätutrustning. Den första var av märket "IMC busDAQ" och hade möjlighet att mäta signaler både från truckens CAN-nät samtidigt som analoga signaler kunde mätas med hjälp av en Analog/CAN-omvandlare kallad "CANSAS". CAN-nätet är ett nät för intern kommunikation mellan olika delar i trucken. Att alla signaler kunde mätas samtidigt, med en gemensam tidsvektor, ansågs som en stor fördel då signalerna i efterhand kunde plottas mot varandra och ge en god överblick om hur trucken uppförde sig.

Senare byttes mätutrustningen ut pga prioritetsskäl. Den utrustning som då användes var av märket "Kvaser Memorator" och bestod av ett minne som loggade CAN-meddelanden. Detta innebar en begränsning till endast mätsignaler som kunde läsas från truckens CAN-nät.

## 5.1.2 Tillvägagångssätt vid mätning

Det var meningen att data skulle plockas direkt från CAN, men tyvärr var det fel på en av CAN-ingångarna på busDAQ-utrustningen. Detta gjorde att alla signaler måste tas in på en och samma CAN-ingång. Genom att seriekoppla flera CANSAS-enheter tills tillräckligt många kanaler erhålls kan problemet undvikas. Eftersom bara analoga signaler kan mätas i CANSAS-enheterna, måste signalerna från CAN först göras om till analoga signaler via ett instrument som kallas KARIN. Detta instrument är resultatet av ett tidigare examensarbete där man ville ha ett instrument för att enkelt mäta olika signaler på truckens CAN-nät.

Genom att seriekoppla två CANSAS-enheter kunde alla analoga signaler kopplas in till den enda befintliga CAN-ingången på busDAQ-enheten.

## 5.1.3 Mätpunkter

Insamling av mätdata skedde delvis genom att plocka ut data från truckens CAN-nät och delvis genom direkt mätning av analoga signaler. Tabell 5.1 sammanfattar vad som mättes.

**Tabell 5.1:** Mätpunkter – Reflex.

Mätpunkt	Typ
Motorvarvtal [rpm]	CAN
Motormoment [Nm]	CAN
Motortemperatur [°C]	Analog
Hastighet [km/h]	Analog

### Motorvarvtal

Denna signal mäts från CAN och ger information om med vilket varvtal drivmotorn roterar. Givaren sitter inbyggd i motorlagret och antas ge ett värde med god noggrannhet.

### Motormoment

Denna signal plockades ut från CAN-nätet. Noggrannheten på signalen är svår att avgöra då kunskapen kring den motorstyrning som returnerar signalen är bristfällig. Det visar sig senare dock att den skillnad i momentvärde som eftersöktes ändå kunde påvisas.

### Motortemperatur

Motortemperaturen mättes med ett laserinstrument som man belyser motorn med. Temperaturen som angivits i mätresultaten är det maxvärde som avlästes under en mättid på ca 3-4 sekunder.

## Hastighet

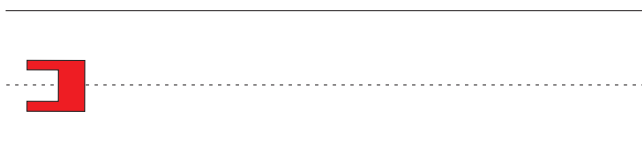
Truckens faktiska hastighet mättes genom att hänga på ett hjul som drev en dynamo. Spänningen som denna genererade var i förhållandet  $1 V=1 \text{ km/h}$ .

### 5.1.4 Körcykel

För att kunna jämföra de olika mätserierna med varandra kördes trucken på samma sätt under alla mätningar.

Trucken kördes rakt fram längs en ”truckgång” (Figur 5.1) med en längd på ca 60 m. Innan mätningen påbörjades ställdes trucken upp i ena änden av gången och drivhjulet vreds upp i körriktningen. Efter att mätutrustningen initierats för att påbörja en ny mätning accelererades trucken till maximal hastighet genom fullt gaspådrag. Att det skulle vara just fullt gaspådrag var av bekvämlighetsskal. Det är svårt att trampa ner gaspedalen och sedan hålla den i ett fixt läge som inte är ändläget. Denna hastighet hölls sedan konstant under så lång tid som tilläts för att trucken skulle hinna bromsas upp innan gångens slut.

Målet med körcykeln var att köra så lång sträcka som möjligt med maximal hastighet, dvs så lång tid som möjligt med det moment som krävs för att bibehålla maximal hastighet.



**Figur 5.1:** Schematisk bild över truckgången.

### Identifiering av körfall

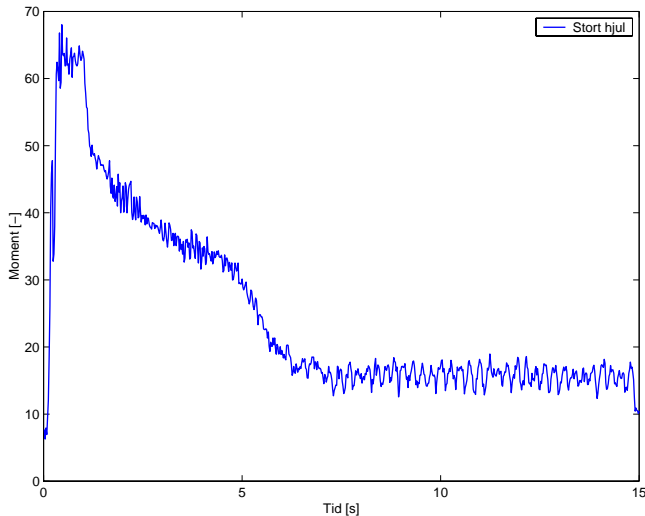
Körcykeln, som beskrivs ovan, har valts med tanke på hur en truck vanligtvis körs. Under ett körpass så kommer trucken med största sannolikhet att vid ett flertal tillfällen att gå olastad. Med kännedom om hur förarna använder trucken, är det oftast full gas som gäller, då många arbetar på ackord. När trucken går olastad och åker med topphastighet, kommer drivmomentet att stabiliseras på en lägsta nivå. Då skulle det vara möjligt att mäta denna nivå.

## 5.2 Mätresultat

Nedan behandlas resultatet av mätningarna på trucken och jämförelser görs mellan olika körfall.

## 5.2.1 Signalmanipulation

Signalerna som uppmättes var för brusiga för att kunna jämföras utan att filtreras. Figur 5.2 föreställer en ofiltrerad momentkurva för ett oslitet hjul utan last. Där syns det tydligt att det är svårt att direkt säga något om den lägsta nivån. Bruset har en hög frekvens och därför är det lämpligt att filtrera med ett Butterworth-filter av lågpassstyp. För att veta hur detta filter ska konstrueras görs en spektralanalys på momentkurvan. I Figur 5.3 ses spektralanalysen. Vid mycket låg frekvens syns en stor topp som innebär högt frekvensinnehåll. För att ta reda på vilka frekvenser som ska filtreras bort, studeras en zoom i Figur 5.4. Om signalen filtreras med ett lågpassfilter som har spärrfrekvensen ca 2 Hz, försvinner det mesta av bruset, medan kurvformen bibehålls.



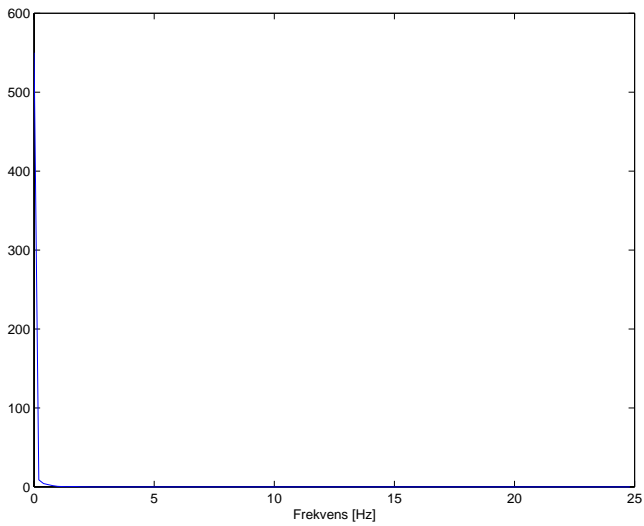
Figur 5.2: Ofiltrerad momentkurva för oslitet hjul.

## 5.2.2 Jämförelse mellan olika körningar

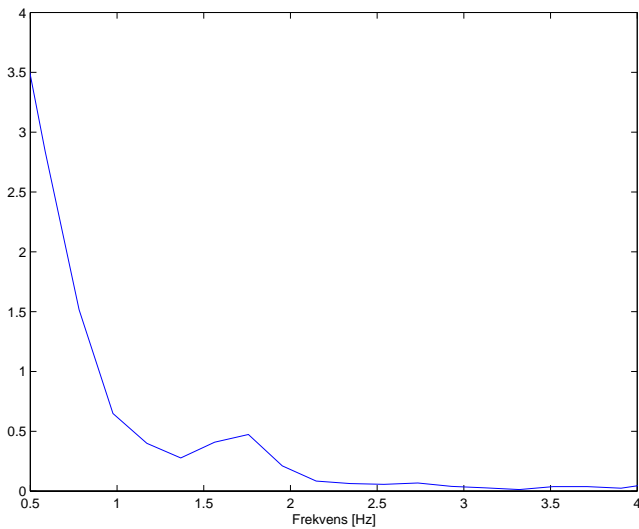
För att kunna studera hur momentet förändras med diametern på drivhjul- et, användes tre olika hjuldiametrar. Det stora hjulet har en diameter på 310 mm, mellanhjulet 285 mm och det lilla hjulet 260 mm.

### Stort-mellan-litet hjul

Vid jämförelse mellan de tre olika hjulstorlekarna kan en tydlig skillnad ses mellan de olika momentkurvorna. Dels sjunker den lägsta nivån, dels flyttas "knäet" åt vänster då diametern minskar. Figur 5.5 visar en plott för alla tre diametrarna. Där finns även varvtalet för de olika diametrarna.



**Figur 5.3:** Spektralanalys av momentkurva.

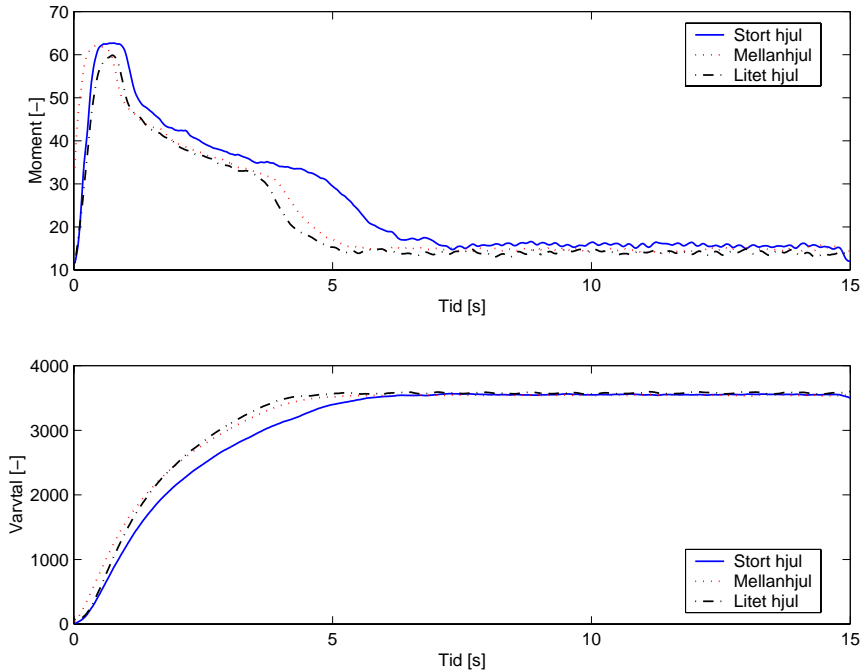


**Figur 5.4:** Inzoomad spektralanalys av momentkurva.

Det tar lite längre tid för trucken att accelerera upp till maxvarvtalet (som är styrt av motorstyrningen), eftersom det behövs ett större moment att driva runt hjulet då det har en större diameter. I Figur 5.6 ses lägsta nivån för momentet i Figur 5.5 inzoomad, för att skillnaden ska synas tydligare.

Eftersom bara tre hjul har används, är det svårt att säga något hur för-

ändringen sker. Har förändringen ett linjärt förlopp, eller är det något annat beroende? För att svara på den frågan bör fler olika diametrar undersökas.

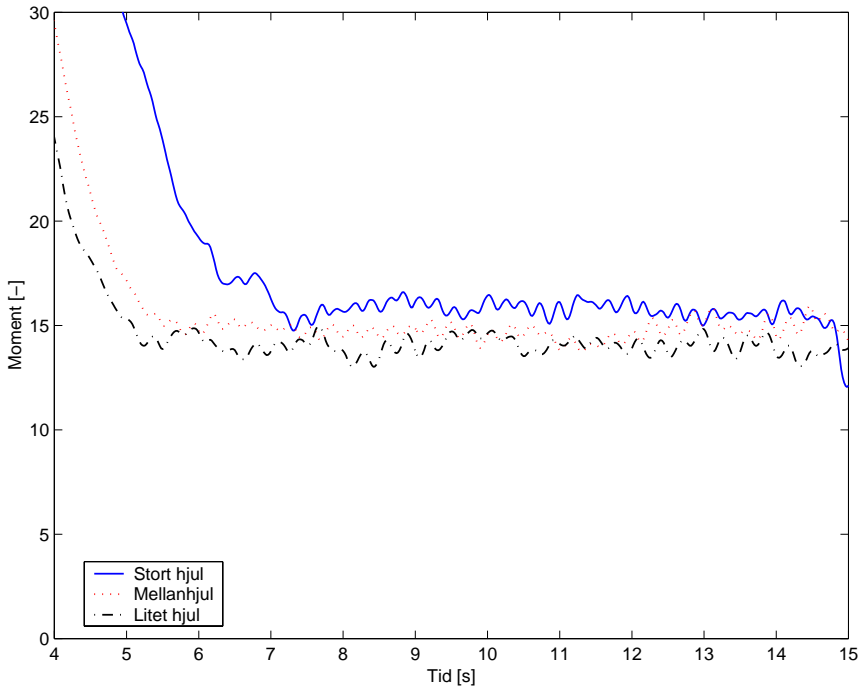


**Figur 5.5:** Moment- och varvtalskurvor för olastad truck vid olika hjuldiametrar.

I motsvarande figur från modellen (Figur 4.6) så syns det att kurvorna har samma förlopp i verkligheten som i modellen. ”knäet” på kurvorna flyttar sig åt samma håll, och kurvan för det lilla hjulet flyttar sig mer än vad kurvan för mellanhjulet gör. Däremot finns inte skillnaden i lägsta nivå på momentet i modellen. Även kurvorna för varvtalet får en kurvform som förväntades. Att det tar längre tid att accelerera upp trucken till maxvarvtal med ett stort hjul, än med ett litet syns i både modellen och i mätningarna på trucken.

### Varm-kall olja i växellåda

För att simulera en ökad friktion i växellådan, gjordes ett par mätningar då oljan i växellådan var kall. För det stora hjulet observeras att när friktionen ökar, så ökar även den lägsta nivån på momentet. Figur 5.7 visar skillnaden med eller utan friktion i växellådan för ett oslitet hjul. Även här observeras att varvtalet inte kommer upp i maxvarvtal, eftersom momentet är högre. Eftersom det inte är känt hur mycket friktionen ökade, kan inte heller säga något om förhållandet i förändringen.



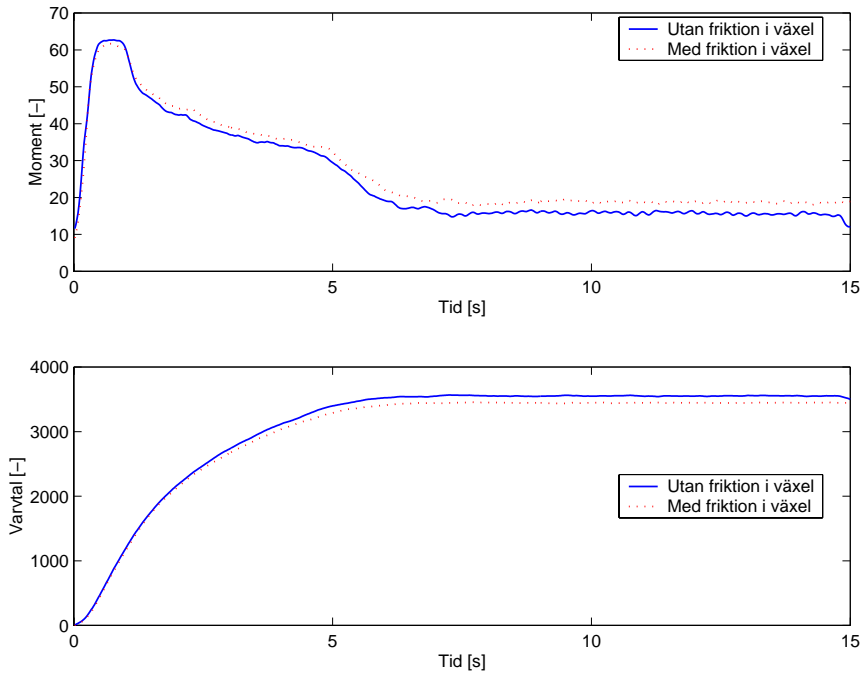
**Figur 5.6:** Moment- och varvtalskurvor för olastad truck vid olika hjuldiametrar.

I modellen motsvarades detta av ökad friktion i växellådan. Vid jämförelse med motsvarande figur från modellen (Figur 4.7), observeras återigen att kurvorna får ungefär samma uppförande. I både modellen och i mätningarna så höjs lägsta nivån på momentkurvan, samt ”knäet” förskjuts åt höger då friktionen ökar. Det syns också tydligt att varvtalet inte kommer upp i maxvarvtal. Att det här syns en skillnad i lägsta nivån på momentet i modellen beror på modellen klarar av att simulera förluster genom friktion bättre än den klarar av förändringar i hjuldiametern.

### Med-utan last

Momentets lägsta nivå ligger högre då trucken är lastad. Vid låga laster syns detta nästan inte alls, men ökas lasten blir det mer tydligt att nivån höjs. Däremot syns en tydlig förändring i kurvformen. ”knäet” flyttas åt höger. Figur 5.8 visar skillnaden för ett oslitet hjul i fallen då trucken är olastad och då den är lastad med 1510 kg. Samma uppträdande erhöles för samtliga hjul. I varvtalskurvan syns det att den lastade trucken inte kommer upp till maxvarvtalet. Detta beror på att varvtalet och momentet är kopplade till varandra så att ett högre moment ger ett lägre varvtal.

Vid motsvarande test i modellen (Figur 4.8), fås återigen samma kurv-



**Figur 5.7:** Moment- och varvtalskurvor vid varm och kall växellådsolja.

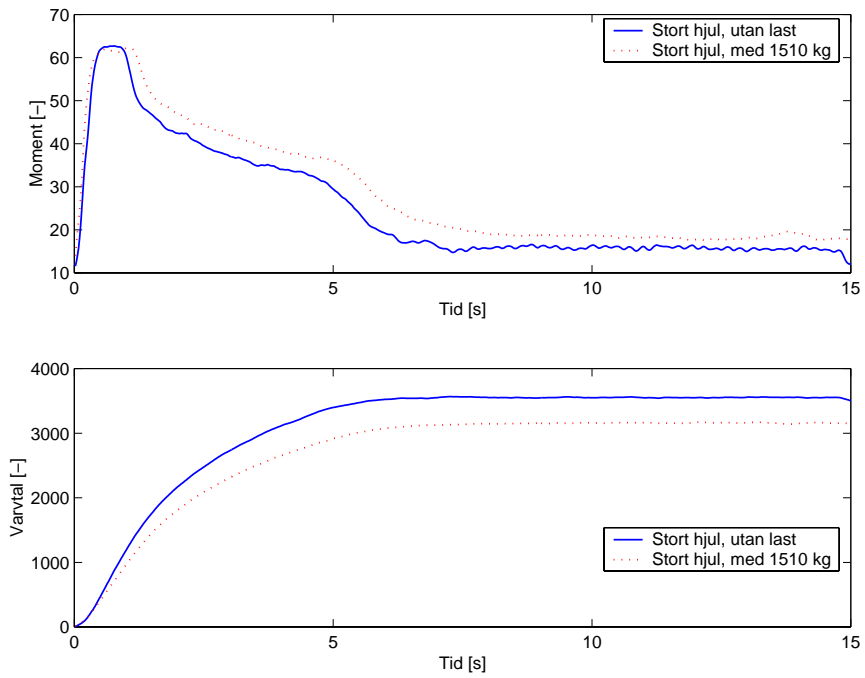
form på momentet. Det syns tydligt hur ”knäet” flyttas åt höger då trucken är lastad. Däremot visar modellen inte den höjning i lägsta nivå på momentet som finns i mätningarna på trucken. Detta beror på att modellen inte är så bra på att modellera förändringar i massan. I varvtalskurvorna syns det att det tar längre tid för trucken att accelerera upp till maxvarvtal. I modellen når den maxvarvtal, medan mätningarna visar att trucken inte driver upp varvtalet till maxvarvtal då den har tung last.

### 5.2.3 Resultat i siffror

Genom mätningarna på trucken kunde en förändring i lägsta nivå på momentet detekteras då diametern förändrades. Drivmomentet för ett stort hjul (310 mm) räknas som normalnivå, eftersom det är helt oslitet. Genom att studera och jämföra skillnaden mot mellanhjulet och det lilla hjulet kunde nivåökningen uttryckas i procent. I tabellen nedan ses dessa siffror.

Diameter, mm	Minskning, %
285	7
260	11





**Figur 5.8:** Moment- och varvtalskurvor för oslitet drivhjul vid olika laster.



# Kapitel 6

## Slutsatser

I detta kapitel sammanfattas resultatet. Avslutningsvis kommer tankar och idéer kring framtida förbättringar, som uppkommit under tiden för examensarbetet att diskuteras.

### 6.1 Resultat

Nedan presenteras en sammanställning av de resultat som erhöles då de identifierade felparametrarna varierades.

#### 6.1.1 Hjuldiameters inverkan på drivmomentet

En tydlig skillnad i lägsta nivån på momentkurvorna kunde observeras då hjuldiametern ändrades. Eftersom endast tre olika hjuldiametrar har studerats är det svårt att säga något om hur förändringen sker, om den är linjär eller om den har något annat förhållande. I Tabell 6.1 ses förändringen i lägsta nivån hos momentet från drivmotorn i procent, jämfört med den normala momentkurvan som gäller för diametern 310 mm, dvs ett oslitet drivhjul. Det är således fullt möjligt att, genom att observera drivmomen-

Diameter, mm	Minskning, %
285	7
260	11

**Tabell 6.1:** Förändring på lägsta momentnivå för olika hjuldiametrar

tet, avgöra huruvida truckens drivhjul är slitet eller inte.

#### 6.1.2 Friktionens inverkan på drivmomentet

I testet med en kall truck, syntes det tydligt att en ökad friktion i växel-lådan ger en högre nivå på lägsta momentet. Eftersom det inte gick att

mäta hur mycket friktionen ökade, gick det inte heller att säga något om hur sambandet mellan friktionen och denna höjning ser ut. Det kan bara konstateras att friktionen i växeln påverkar momentet. Inga mätningar har gjorts vid olika hjuldiametrar för att se om friktionen har en större eller mindre inverkan då diametern förändras.

### 6.1.3 Lastens inverkan på drivmomentet

I Figur 5.8 syns hur lasten inverkar på momentet. Mer last kräver ett större moment för att driva trucken framåt. Denna körning är gjord med ett stort hjul. Vid en mindre diameter ökade också momentet, men inte lika mycket som vid ett stort hjul.

## 6.2 Modellen

Modellen för diagnostisering av drivhjulet uppfyllde inte alla förväntningar vad gäller dess funktion men kunde ändå användas för att säga något om de olika felparametrarna. Vid simulering av en minskad diameter på drivhjulet samt ökad massa på trucken kunde de principiella skillnaderna på drivmomentet från motorn observeras. Dessa skillnader syftar på att bli ”knäet” i momentkurvan förskjuts åt endera hållet. Dock kunde inte den förväntade sänkningen av lägsta momentnivån erhållas.

Då ökad friktion i växellådan simulerades observerades ett bättre resultat. Här erhöles en klar skillnad i drivmomentets lägsta nivå samtidigt som de principiella skillnaderna kunde observeras.

## 6.3 Framtidsvisioner, tankar och idéer

Under tiden för examensarbetet har ett par nya idéer dykt upp tillsammans med tankar kring vidareutveckling av BT:s visioner kring en förbättrad service.

### 6.3.1 Vidareutveckling av diagnostiksystemet

Detta examensarbete har visat på ett tillämpningsområde för modellbaserad diagnos på BT:s truckar. Modellen som konstruerades i Kapitel 4 påvisar detta arbetssätt som med fördel även kan användas för att diagnostisera flera av truckens delsystem, några av dem presenterade i Kapitel 2, Figur 2.3.

#### Broms

För att kontrollera slitaget av truckens bromsar är en idé att titta på varvtalets derivata och se om denna har ett jämnt förlopp eller inte. Är förloppet ”ryckigt” är det förmodligen så att bromsarna tar ojämnt.

En annan indikator på bromsarnas slitage är antalet inbromsningar samt hur kraftiga dessa varit.

### **Kedja**

Truckens lyftkedjor utsätts för töjning som är olika för olika applikationer. I dagsläget byts kedjorna ut då de har fått en viss längdökning. Någon form av indikator som talar om när denna längdökning uppnåtts vore önskvärd. Exempelvis kunde denna indikator bestå av att kontrollera antalet lyft, hur höga lyften varit samt deras vikt. Ett annat alternativ vore att ha någon form av längdgivare som varnar då maxlängden på kedjan uppnåtts.

### **Stativ**

Då stativet slits uppstår glapp i glidbanorna. Detta glapp skulle kunna märkas på lyftmotorernas varvtal eller momentkurva då ett ryckigt beteende under lyftet borde kunna observeras.

### **Motor**

En indikator på att motorn börjar bli sliten skulle kunna vara dess driftstemperatur kombinerat med den tid den varit i drift.

### **Pump**

För att indikera en sliten pump vore det förmodligen möjligt att titta på flödet genom pumpen som en funktion av dess varvtal.

### **Olja**

Oönskade partiklar i oljan skulle kunna detekteras genom att studera flödet genom oljefiltret. Om flödet är lågt är förmodligen oljefiltret fullt och behöver bytas ut. Dock måste man här ta hänsyn till oljans temperatur eftersom kall olja är mer trögflytande än varm.

## **6.3.2 Vidareutveckling av modellen**

Modellen som skapades innehöll en del saker som kan vidareutvecklas för att göra den bättre.

### **Växellådans tröghetsmoment**

Då växellådans tröghetsmoment  $J$  inte är känt utan har skattats (Bilaga A) skulle modellen kunna förbättras genom tillgång till mer noggranna värden på  $J$ .

## Modellering av växellådans friktion

Det uppkommer en del förluster i form av friktion i truckens växellåda under körning. I modellen som konstruerades i Kapitel 4 antogs denna friktion  $b$  vara en konstant. I verkligheten är denna friktion mer avancerad än så och beror bl a på växellådans varvtal. En möjlig riktning att jobba i för att förbättra modellen är därför att undersöka denna friktion närmare.

## Modellering av truckens motorstyrning

De största problemen vid modelleringen var truckens motorstyrning. Detta eftersom dess funktion endast till vissa delar var känd vilket fick som följd att den blev väldigt ”grovt” modellerad.

Den motorstyrning som användes var den som finns på truckarna i dagsläget. Denna har ett par år på nacken och tyvärr är dokumentationen bristfällig, vilket medförde svårigheter vid modelleringen.

Eftersom en ny motorstyrning är under utveckling är det möjligt att utveckla modellen då förhoppningsvis bättre vetenskap finns om denna motorstyrning.

## Frekvensanalys av varvtalet

Det diagnostiksystem som diskuterats i denna rapport har uteslutande behandlat drivhjulens nedslitning. Lika ofta som drivhjulet slits ner händer det att bitar av hjulbanan lossnar och trillar bort. Genom att analysera vilka frekvenser varvtalet innehåller vore det möjligt att detektera detta då ”störningar” av varvtalet borde uppstå.

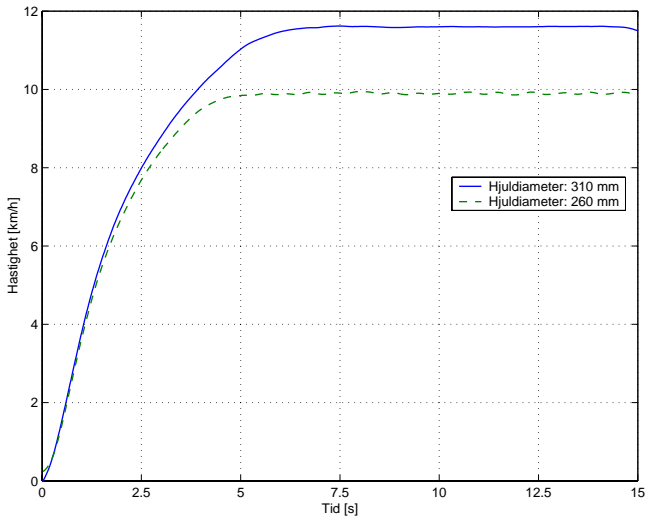
### 6.3.3 Övriga tankar

#### Samordnad service

Säg att det finns ett antal truckar på en site och att en av dem indikerar ”service”. Kan det då vara lönsamt att se om det finns ytterligare truckar, som inte indikerar ”service”, som det kan vara värt att genomföra en förberedande service på? Utförs denna service vid samma tillfälle finns förmodligen mycket att tjäna.

#### Kompensation av förlorad hastighet

Då drivhjulet på trucken slits ner kommer detta att innebära en minskning av truckens topphastighet. Under mätserierna mättes truckens verkliga hastighet med hjälp av ett hjul som rullades vid sidan av trucken. Figur 6.1 visar hur stor hastighetsskillnaden är mellan ett drivhjul med en diameter på 310 mm mot ett med en diameter på 260 mm. Som synes i Figur 6.1 är inte hastighetsskillnaden att försumma. En kompensation av



**Figur 6.1:** Truckens verkliga hastighet vid olika diametrar på drivhjulet.

hastigheten vore enkel att genomföra och skulle med stor säkerhet uppskattas av truckens förare då hastighetsskillnaden på nästan 2 km/h är väl märkbar under körning.





# Bilaga A

## Simulinkmodell i Matlab

I denna bilaga finns den modell som konstruerades i kapitel 4. Bilagan inleds med lite korta kommentarer till en del av parametrarna och efterföljs sedan av Matlabkod och blockscheman som visar hur modellen är uppbyggd.

### A.1 Kommentarer till modellen

De parametrar som orsakat störst problem vid modelleringen är växellådans tröghetsmoment  $J$  och dess friktion  $b$ . För att kunna simulera modellen skattades därför dessa parametrar enligt nedan.

#### Växellådans tröghetsmoment

Truckens växellåda (Figur 4.5) är av enkel kugghjulstyp. De två ingående kugghjulen antas vardera ha tröghetsmomenten  $J_1$  och  $J_2$ . Då växellådan har utväxlingen  $r$  kan det totala tröghetsmomentet  $J$  tecknas som  $J = J_1 r^2 + J_2$ , se Kapitel 4 för ytterligare detaljer om detta.

Problemet består nu av att på något sätt skatta  $J_1$  och  $J_2$ . Detta löstes genom att anta att de två kugghjulen hade formen av två ”korta” cylindrar. Antas kugghjulen vara av materialet järn blir storleksordningen på  $J_1$  och  $J_2$  ungefär

$$J_1 \approx 0.005$$

$$J_2 \approx 0.00135$$

#### Växellådans friktion

Växellådans friktion är svårare att skatta. Olika värden på parametern  $b$  provades tills slutligen ett ”bra” utseende på moment och varvtalskurva erhöles. Detta inträffade då  $b \approx 60$ .

## A.2 Matlabkod

---

```

% Initiera konstanter som kommer användas i modellen.
r = 20.89;           % Växelns utväxling
b = 60;             % Friktionen i växellådan
mT = 5310;          % Trukens massa i kg.
d = 0.310;          % Hjulets diameter i mm.
J1 = 0.005;         % Tröghetsmomentet för växelns 'första' hjul.
J2 = 0.00135;       % Tröghetsmomentet för växelns 'andra' hjul.

C = J1*r^2+J2+(mT*d^2/4);
                                                                    10

% Läs in data som modellen ska skapas från

torque=compare.torque.M13(1:750);
rpm=compare.rpm.M13(1:750);

% De data modellen skall skapas från är uppmätta med ett
% antal instrument som vi måste skala om mätvärdena för.

% 1. Vi använde KARIN, 0-5 volt motsvarar 0-255
                                                                    20

    torque = torque .* 255/5;
    rpm = rpm .* 255/5;

% 2. Värdena 0-255 som fås ut från CAN skall räknas om...

    torque = torque .* 1500/255;
    rpm = rpm .* 4400/255;

% Filtrera signalen med ett butterworthfilter.
[B,A] = butter(1,0.08);
RPM=filter(B,A,rpm);
TORQUE=filtfilt(B,A,torque);
                                                                    30

% Välj ut den del av kurvan som skall användas.

newRPM = max(RPM)-RPM;
newTORQUE = TORQUE;

% Sortera värdena i ordning så att inte 'look-up-table'
% klagar samt skala om strömmen till ett " normalt" moment.
                                                                    40

values = [newRPM newTORQUE];
values = sortrows(values,1);

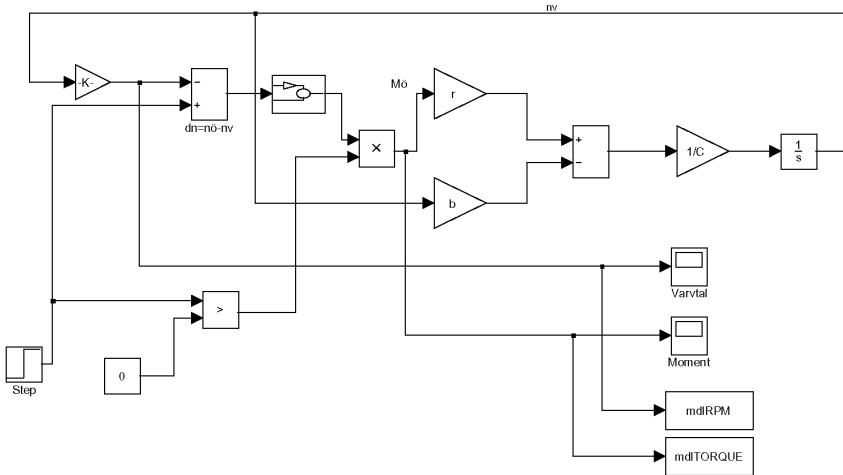
refRPM = values(:,1);
refTORQUE = 0.2233*values(:,2);

maxRPM = max(refRPM);
minRPM = min(refRPM);
maxTORQUE = max(refTORQUE);
minTORQUE = min(refTORQUE);
                                                                    50

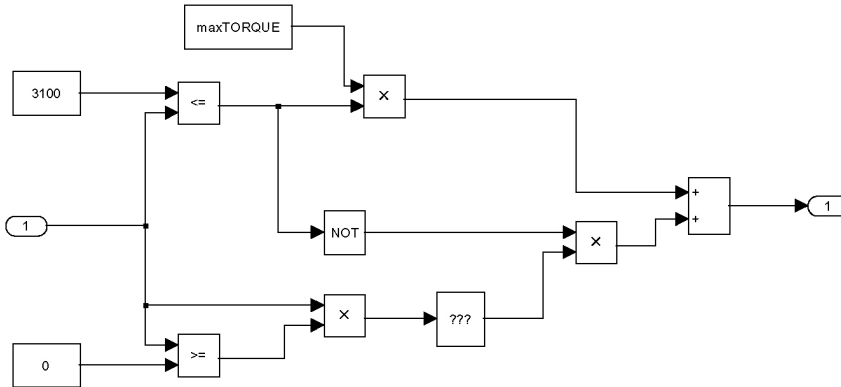
```

---

## A.3 Blockschemamodell



Figur A.1: Huvudblocket i Simulinkmodellen.



Figur A.2: Modellering av uppslagstabellen som ska motsvara motorstyrningen.



# Bilaga B

## Mätserier

I denna bilaga finns en förteckning över gjorda mätningar. Av tabellen framgår vilka parametrar som ändrats mellan de olika mättillfällena.

Datum	Mätning	Hjul	Temperatur	Last
03-03-13	M1	Stort	-	0
03-03-13	M2	Stort	-	0
03-03-13	M3	Stort	-	0
03-03-13	M4	Stort	-	0
03-03-17	M5	Stort	-	0
03-03-17	M6	Stort	-	0
03-03-17	M7	Stort	-	0
03-03-17	M8	Stort	-	0
03-03-17	M9	Litet	-	0
03-03-17	M10	Litet	-	0
03-03-17	M11	Litet	-	0
03-03-17	M12	Litet	-	0
03-03-19	M13	Stort	34.1	0
03-03-19	M14	Stort	34.4	0
03-03-19	M15	Stort	34.9	0
03-03-19	M16	Stort	34.9	0
03-03-19	M17	Stort	38	252
03-03-19	M18	Stort	39.2	252
03-03-19	M19	Litet	35.9	0
03-03-19	M20	Litet	37.2	0
03-03-19	M21	Litet	37.3	0
03-03-19	M22	Litet	38.8	0
03-03-19	M23	Litet	40.6	252
03-03-19	M24	Litet	41.2	252
03-04-03	M25	Stort	22.3	0
03-04-03	M26	Stort	23.8	0
03-04-03	M27	Stort	24.1	0
03-04-03	M28	Stort	25.6	0

---

<b>Datum</b>	<b>Mätning</b>	<b>Hjul</b>	<b>Temperatur</b>	<b>Last</b>
03-04-03	M29	Stort	26.4	1002
03-04-03	M30	Stort	27.2	1002
03-04-03	M31	Stort	29.1	1510
03-04-03	M32	Stort	30.1	1510
03-04-03	M33	Mellan	30.8	0
03-04-03	M34	Mellan	31.5	0
03-04-03	M35	Mellan	31.5	0
03-04-03	M36	Mellan	31.9	0
03-04-03	M37	Mellan	34.2	252
03-04-03	M38	Mellan	34.5	252
03-04-03	M39	Mellan	34.7	1002
03-04-03	M40	Mellan	36.7	1002
03-04-03	M41	Mellan	37.4	1510
03-04-03	M42	Mellan	37.9	1510

# Bilaga C

## Notation

Beteckning	Förklaring
$b$	Friktion
CAN	Nät för intern kommunikation i trucken
$\delta(x)$	Diagnostiksystem
$\delta_n(x)$	Hypotestest $n$
$d$	Hjuldiameter
$F$	Överföringskraften i växellådan
$F_p$	Felmod $p$
$F_T$	Drivkraften på trucken
$G(s)$	Motorstyrningens överföringsfunktion
$H^0, H^1$	Hypoteser
$J$	Tröghetsmoment
$J_n$	Tröskelvärde
$M$	Verkligt moment
$M_{\ddot{o}}$	Önskat moment
$M_1$	Moment från motorn
$M_2$	Moment från växeln
$M_n$	Specifik grupp $n$ av felmoder
$M_n^c$	Komplementet till $M_n$
$m_T$	Truckens totala massa inklusive last
$n_v$	Uppmätt varvtal
$n_{\ddot{o}}$	Önskat varvtal
$n_1$	Varvtal in i växellådan
$n_2$	Varvtal ut från växellådan
$\Delta n$	Varvtalsskillnaden $n_{\ddot{o}} - n_v$
$\Omega$	Gruppen av alla felmoder
$r$	Utväxling
$r_1$	Radie på växelns drivande kugghjul
$r_2$	Radie på växelns utgående kugghjul
$S$	Diagnosbeslut

<b>Beteckning</b>	<b>Förklaring</b>
$S_k$	Sub-diagnosbeslut
$T_n(x)$	Teststorhet
$\theta_1$	Vinkelhastighet in i växellådan
$\theta_2$	Vinkelhastighet ut ur växellådan
$u(t)$	Insignal
$x(t)$	Sträcka trucken rört sig
$y(t)$	Utsignal



# Litteraturförteckning

- [1] Serviceutbildning – can. Utbildningsmaterial för CAN, används för utbildning av tekniker på BT., Augusti 1999.
- [2] BT Products AB, Mjölby, Sweden. *Instruktionsbok – BT RR.*
- [3] James L. Meriam and L. Glenn Kraige. *Engineering Mechanics*, volume 3. John Wiley and Sons, 1993.
- [4] Lennart Råde och Bertil Westergren. *Mathematics Handbook*. Studentlitteratur, fourth edition, 1998.
- [5] Mattias Arnsby och Bo Tägtström. Modellering och reglering av drivenhet i gaffeltruck. Technical Report LiTH-ISY-EX-3333, Institutionen för Systemteknik – Linköpings universitet, 2003.
- [6] Lena Sjödin och Johanna Sjöstedt. Design for service market – developing for the future. Examensarbete, Linköpings universitet, December 2001.
- [7] Carl Nordling och Jonny Österman. *Physics Handbook*. Studentlitteratur, Lund, fifth edition, 1996.
- [8] Torkel Glad och Lennart Ljung. *Reglerteknik – Grundläggande teori*, volume 2. Studentlitteratur, Lund, Juni 2000.
- [9] Torkel Glad och Lennart Ljung. *Modellbygge och simulering*. 2004. Förhandsutgåva för kursen Modellbygge och Simulering, Linköpings tekniska högskola.
- [10] Magnus Senneryd och Mats Wingmo. Idea study reach trucks. BT – Intern rapport, April 2002.
- [11] Erik Frisk och Mattias Nyberg. Diagnosis and supervision of technical processes. Technical report, Fordonssystem – Linköpings universitet, 2002.
- [12] Theresia Ramdén. *Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Fluid Power Systems*. Doktorsavhandling, Linköpings universitet, Februari 1998.

- [13] Sune Söderkvist. *Kretsteori och Elektronik*, volume 2. Tryckeriet Erik Larsson AB, 1996.
- [14] Erik Ljung Stefan Hylander, Claes Avasjö. *Local Area Network Communication for battery powered trucks*. Atlas Copco Controls AB, Stockholm, Sweden, first edition, March 1999.
- [15] Göran Valfridsson. Pegasus – specifikation av elektronikkort innehållande trucklogik och styrservo. Juni 2002.
- [16] Alain Villemeur. *Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment Volume 1*, volume 1. John Wiley and Sons, 1992.