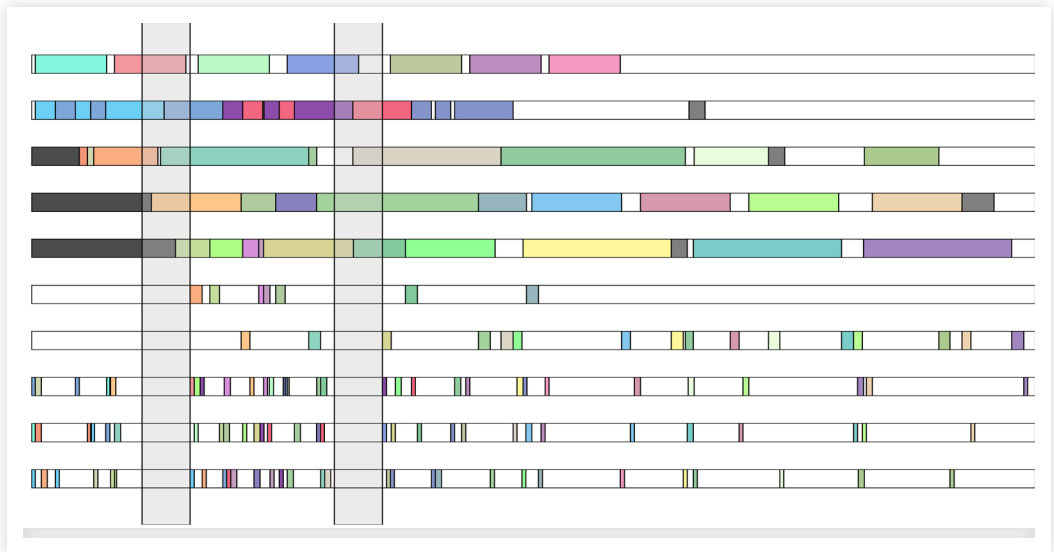


# Optimal schemaläggning av produktionsceller

KARIN THÖRNBLAD



**CHALMERS**





# Introduktion

Att bestämma vilken produkt som ska bearbetas i vilken maskin vid vilken tidpunkt är en uppgift som utförs av tusentals medarbetare varje dag inom olika industrier över hela världen. Ofta är styrningen ostrukturerad och bitvis slumpmässig. En del scheman baseras på enkla prioriteringsregler, såsom t ex FIFO (first-in, first-out), dvs den produkt som väntat längst står näst på tur. Ibland används betydligt mer sofistikerade algoritmer för att planera produktionen och dessa skapar då scheman som tar ett större grepp över planeringssituationen.

Vi har utvecklat en sådan schemalägnings-algoritm med syfte att optimalt planera produktionsverkstäder av typen ”flexible job shop”. Denna typ karakteriseras av att varje

produkt har ett antal förutbestämda operationer inom verkstaden. Viss flexibilitet finns eftersom några av operationerna kan utföras av fler än en av maskinerna i verkstaden. Operationerna som ska utföras på en produkt under ett besök i verkstaden kallas för ett ”jobb”.

I denna skrift sammanfattas resultaten av arbetet med utvecklingen av en algoritm baserad på en matematisk optimeringsmodell. Arbetet har jag utfört som doktorand under handledning av professor Michael Patriksson, docent Ann-Brith Strömberg på institutionen för Matematiska vetenskaper vid Chalmers tekniska högskola och Göteborgs universitet samt adjungerad professor Torgny Almgren som även tjänstgör som logistikexpert på GKN Aerospace.



*Figur 1: Multitaskcellen på GKN Aerospace är en så kallad "flexible job shop". I cellen finns lagerplatser och portar till de bearbetande resurserna. Alla transporter sker med hjälp av en transportkran. Produkterna kommer in i cellen från höger i bilden.*

# Optimal schemaläggning

## Fallstudie: Multitaskcellen på GKN Aerospace

I fabriken på GKN Aerospace i Trollhättan finns en produktionsverkstad av typen ”flexible job shop”, innehållande tio resurser som kallas ”multitaskcellen”, se figur 2. Cellen byggdes med målen att uppnå en hög grad av maskinutnyttjande, korta produktledtider och stor flexibilitet med avseende på både produktmix och typ av bearbetning. Multitaskcellen kan utföra en mängd olika operationer, eftersom fem av cellens resurser är så kallade multitaskmaskiner som kan bearbeta materialet på tre olika sätt: fräsa, svarva och borra.

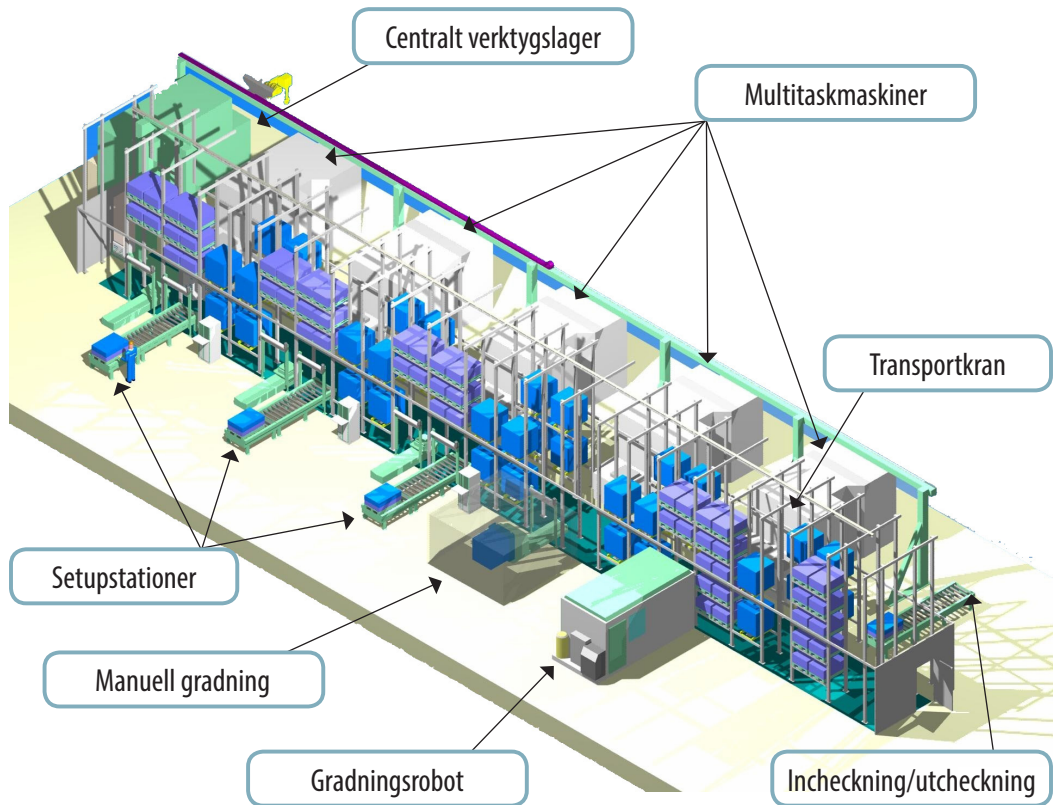
## Dynamisk schemaläggning

Till multitaskcellen flödar ständigt nya produkter som måste schemaläggas. Dessutom kan förhållandena i cellen plötsligt förändras av oförutsedda händelser, som exempelvis att en maskin går sönder. Därför behöver schemat ständigt förnyas, vilket kallas dynamisk schemaläggning. Baserat på våra resultat föreslår vi att ett nytt schema tas fram vid varje skiftstart samt vid varje större oförutsedd händelse. För att vår metod ska fungera praktiskt i verksamheten får tiden för att ta fram ett schema inte överstiga 15 minuter.

## Vad är optimalt?

Inom forskningen har målet för optimering av denna typ av scheman oftast varit att minimera ”makespan”, dvs tiden från schemats starttidpunkt till sluttiden för den sista planerade operationen. Denna målfunktion fungerar dock dåligt i en dynamisk miljö, som den i multitaskcellen liksom i flertalet industriella miljöer med kontinuerlig produktion. Exempelvis riskerar ett jobb att aldrig bli utfört ifall schemat förnyas innan det sista jobbet i det föregående schemat har påbörjats.

Vi föreslår en målfunktion som minimerar en viktad summa av alla jobs sluttider samt förseningar, och ju mer försenat ett jobb blir desto högre prioritet (dvs vikt) får det. På så sätt prioriteras ett jobb högre om det inte har hunnit utföras enligt tidigare scheman. Tonvikten på målfunktionen är att minimera förseningen och om ett jobb slutförs för tidigt har det jobbet ingen försening. Detta innebär att produkterna som lämnar cellen följer produktionsplanen så bra som möjligt, och framför allt är så lite försenade som möjligt. Med andra ord gynnas det övergripande målet – att producera alla produkter enligt plan – av denna målfunktion. En positiv följd är att flödet genom produktionen styrs upp och stabiliseras.



Figur 2: En översikt över multitaskcellen. Produkterna förs in och ut ur cellen via ett in- och utmatningsband. Inne i cellen transporteras de till en lagerplats eller till en av de tre setupstationerna för att monteras i en fixtur. Därefter kan bearbetningen påbörjas.

# En innovativ schemaläggningsmetod

## En iterativ schemaläggningsalgoritm

Vår algoritm för att lösa schemalägningsproblemet i multitaskcellen är baserad på en tidsindexerad matematisk optimeringsmodell. Med hjälp av denna modell har vi kunnat lösa probleminstanser av en storlek som inte kunnat lösas tidigare. Det finns dock två nackdelar med tidsindexerade modeller:

- det stora antalet variabler och villkor som erfordras, samt att
- verkliga data måste avrundas till ett antal hela tidssteg.

För att undvika dessa nackdelar, och för att snabba upp lösningsförfarandet, har vi utvecklat en iterativ schemaläggningsalgoritm som löser den tidsindexerade modellen upprepade gånger, med allt kortare tidssteg. På så sätt erhålls en allt noggrannare lösning samtidigt som antalet variabler och villkor hålls på en rimlig nivå.

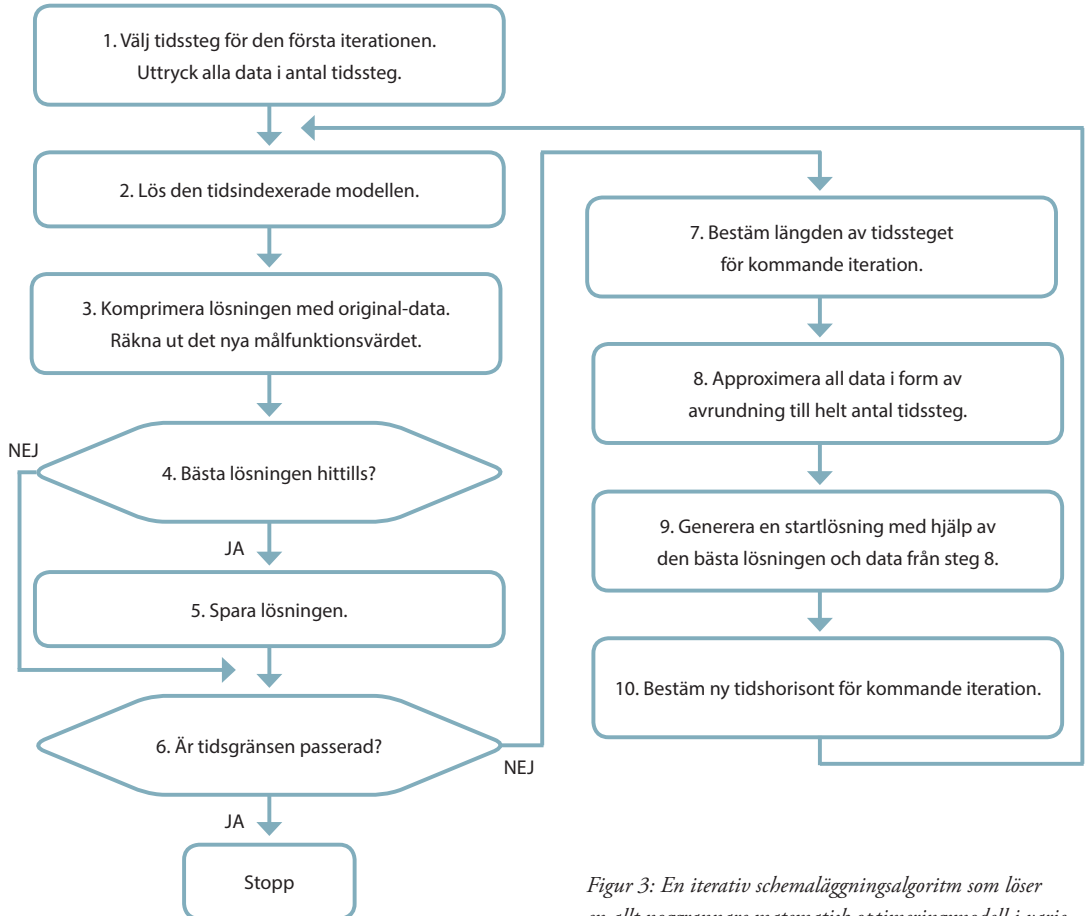
Processen för den iterativa schemaläggningsalgoritmen illustreras i figur 3 och beskrivs nedan.

I steg 1 väljs ett stort tidssteg för den första iterationen. Antalet variabler och villkor blir då oftast så få att det endast tar några få sekunder att erhålla en approximativ lösning i steg 2.

I steg 3 komprimeras lösningen med hänsyn till originaldata. Detta innebär att alla operationer i schemat enligt den aktuella lösningen skjuts så långt mot schemats start som möjligt, så att varje

operation schemaläggs med sin verkliga processtid vid den tidigaste tidpunkt då alla övriga villkor är uppfyllda. Ett exempel på ett övrigt villkor är att en operation måste vara slutförd innan nästkommande operation inom samma jobb kan starta. En lösning kan alltid förbättras på detta sätt eftersom alla operationers processtider är avrundade uppåt i den tidsindexerade modellen. Om den nya lösningen är den bästa som erhållits hittills sparas den (steg 4–5).

I steg 6 avbryts algoritmen ifall den på förhand bestämda tidsgränsen för beräkningarna är passerad, annars används den bästa lösningen för att generera en startlösning samt bestämma en ny tidshorisont för nästa iteration med ett kortare tidssteg (steg 7–10).



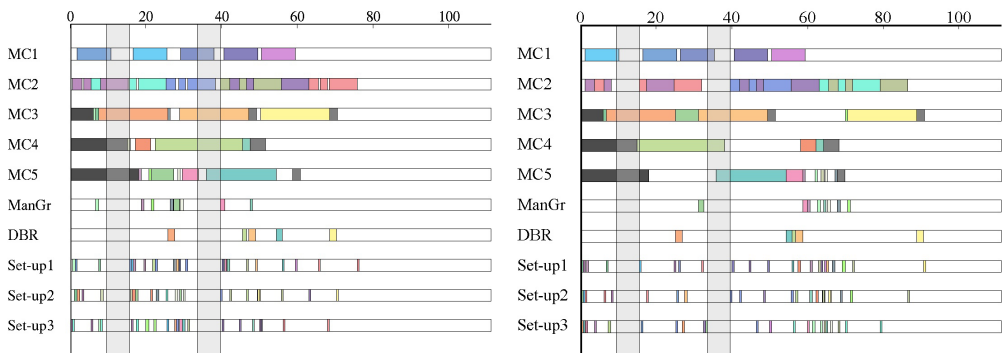
Figur 3: En iterativ schemalägningsalgoritm som löser en allt noggrannare matematisk optimeringsmodell i varje iteration.

# Inkludera verkligheten

I multitaskcellen finns en del omständigheter som inte ingår i definitionen av en generell ”flexible job shop”. I vår tidsindexerade modell för att schemalägga multitaskcellen har vi inkluderat villkor som beskriver när maskinerna blir tillgängliga för första gången, eftersom de kan vara upptagna vid tiden för schemats start. Vi har även inkluderat schemaläggningen av förebyggande underhåll simultant med övriga jobb, vilket innebär att det förebyggande underhållet kan utföras i rätt tid och med minimal störning för övriga jobb. Varje jobb inleds och avslutas med montering i och ur en fixtur, vars typ är specifik för detta jobb. Eftersom fixturerna är dyra finns de endast i ett begränsat antal. Därför är även denna begränsning

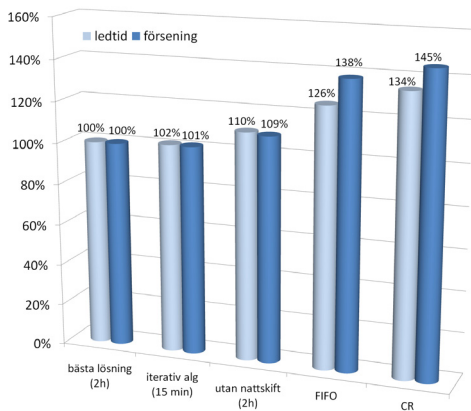
inkluderad i schemaläggningsmodellen. För närvarande är multitaskcellen obemannad under några timmar varje natt. I början respektive slutet av vissa operationer tillåts obemannad bearbetning, vilket innebär att dessa delvis kan utföras under nattskiftet. Denna möjlighet har också inkluderats i modellen.

Scheman som har tagits fram med hjälp av den iterativa schemaläggningsalgoritmen har jämförts med scheman framtagna med prioriteringsreglerna FIFO respektive ”critical ratio” (CR), där den sistnämnda är inbyggd i multitaskcellens styrsystem. I figur 4 visas två scheman för en verklig instans framtagna med den iterativa algoritmen samt FIFO. Alla jobb som finns tillgängliga under det kommande skiftet är medtagna.



Figur 4: Schemat till vänster för ett kommande skift i multitaskcellen är ett resultat av vår iterativa schemaläggningsalgoritmen, medan schemat till höger har tagits fram genom att tillämpa FIFO. Notera att vår iterativa algoritmen har möjlighet att väsentligt höja utnyttjandegraden i multitaskcellen eftersom den tillåter att de obemannade nattskiftet (markerade med vertikala grå halvgenomskinliga fält) utnyttjas mycket mer effektivt. I det vänstra schemat utnyttjas exempelvis maskin MC2 för obemannad bearbetning under större delen av nattskiftet. I FIFO-schemat förloras mer än tolv timmars kapacitet, eftersom ingen nattlig obemannad bearbetning är möjlig i MC2.





*Figur 5: Den genomsnittliga ledtiden respektive förseningen i det schema som tagits fram efter 15 minuters beräkningstid med vår iterativa metod skiljer sig mycket lite från de bästa lösningar som erhålls efter 2 timmars beräkningstid.*

## Robusta scheman

Eftersom målfunktionen är konstruerad så att ett jobb blir mer prioriterat ju mer försenat det är, blir jobb som inte har påbörjats schemalagda på ungefär samma ställe i ett nytt schema. Detta är en form av robusthet. Planeraren kan dessutom skapa robusthet genom att frysa de första jobben i schemat innan detta förnyas. Ytterligare en typ av robusthet som är inbyggd i den iterativa schemalägningsalgoritmen är att alla operationers processtider är avrundade uppåt i den tidsindexerade modellen. Därför är schemat både nästan optimalt och möjligt att utföra även i de fall då operationerna kräver en något längre processtid än planerat.

## Stor potential

Vi har testat vår algoritmen med tolv verkliga probleminstanser som samlats in från multitaskcellen under perioden 2012–2013. För var och en av instanserna har scheman tagits fram med vår iterativa schemalägningsalgoritmen samt med prioriteringsreglerna FIFO och CR. I figur 5 jämförs medelvärden av alla ingående jobs

ledtider och förseningar i respektive schema. Medelvärdena är normerade med motsvarande värden från de bästa lösningarna som erhållits efter två timmars beräkningstid med vår iterativa schemalägningsalgoritmen.

Den genomsnittliga ledtiden för (och förseningen av) jobben i de scheman som har tagits fram med vår iterativa schemalägningsalgoritmen under en beräkningstid av 15 minuter är endast 1.5% (1.3%) längre än för de bästa lösningarna, se figur 5. Om möjligheten att schemalägga obemannade operationer under nattskeften ej beaktas är motsvarande tider i stället 10% (9%) längre. De genomsnittliga ledtiderna (förseningarna) i de scheman som tagits fram med hjälp av prioriteringsreglerna FIFO och CR är 26% (38%) respektive 34% (45%) längre än motsvarande tider för de bästa lösningarna. Det finns med andra ord en stor potential att förbättra utnyttjandegrad och produktledtider genom att använda en avancerad schemalägningsalgoritmen jämfört med enklare schemalägningsmetoder.

En förstudie inför en implementering av våra schemalägningsalgoritmer i multitaskcellen kommer att genomföras vid GKN Aerospace i Trollhättan under hösten 2013.

## Referenser och lästips

Thörnblad, K. (2011). **On the Optimization of Schedules of a Multitask Production Cell.** Licentiatuppsats. Institutionen för Matematiska vetenskaper, Chalmers tekniska högskola och Göteborgs universitet, Göteborg.

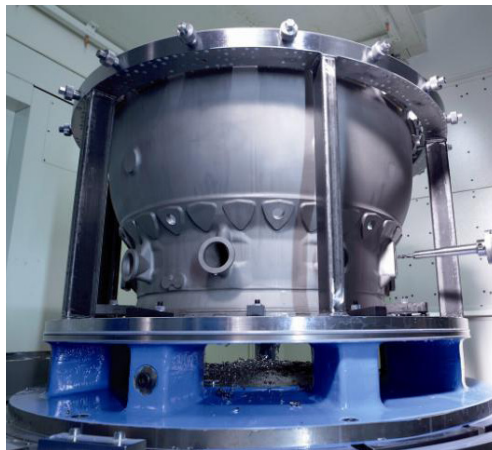
Thörnblad, K. (2013). **Mathematical Optimization in Flexible Job Shop Scheduling: Modelling, Analysis, and Case Studies.** Doktorsavhandling. Institutionen för Matematiska vetenskaper, Chalmers tekniska högskola och Göteborgs universitet, Göteborg.

Thörnblad, K., Strömberg, A.-B., Patriksson, M. och Almgren, T. (2013). **A competitive iterative procedure using a time-indexed model for solving flexible job shop scheduling problems.** Preprint nr 2013:10. Institutionen för Matematiska vetenskaper, Chalmers tekniska högskola och Göteborgs universitet, Göteborg.

Thörnblad, K., Strömberg, A.-B., Patriksson, M. och Almgren, T. (2013). **Scheduling optimization of a real flexible job shop including fixture availability and preventive maintenance.** Accepterad för publicering i tidskriften European Journal of Industrial Engineering.

Thörnblad, K., Strömberg, A.-B., Patriksson, M. och Almgren, T. (2013). **Scheduling optimization of a real flexible job shop including side constraints regarding maintenance, fixtures, and night shifts.** Preprint nr 2013:11. Institutionen för Matematiska vetenskaper, Chalmers tekniska högskola och Göteborgs universitet, Göteborg.

Thörnblad, K., Almgren, T., Strömberg, A.-B. och Patriksson, M. (2011). **Optimering av scheman för en verklig produktionscell: tidsdiskretisering reducerar lösningstiden utan att lösningarnas kvalitet försämras.** PLANs forsknings- och tillämpningskonferens, 31 aug – 1 sep 2011, Norrköping, Sverige.



Figur 6: En produkt bearbetas i en multitaskmaskin.

# Northern LEAD Outlook

*Northern LEAD Outlook* är en serie sammanfattningar av vetenskapliga publikationer som har producerats i Northern LEAD:s nätverk. Serien innehåller hittills följande utgåvor:

*Utgåva nummer 1:*

## **Materialförsörjning och outsourcing av produktion**

**Anna Fredriksson**

Logistik & Transport, Chalmers

*Utgåva nummer 2:*

## **Kombitransporter ur ett urbant perspektiv**

**Sönke Behrends**

Logistik & Transport, Chalmers

*Utgåva nummer 3:*

## **Plattform för integrerad logistik**

**Badi Almotairi**

Logistik & Transport, Chalmers

*Utgåva nummer 4:*

## **Materialförsörjning i fabrik – val av princip**

**Robin Hanson**

Logistik & Transport, Chalmers

*Utgåva nummer 5:*

## **Informationsdelning för effektiva vägtransporter**

**Henrik Sternberg**

Logistik & Transport, Chalmers

*Utgåva nummer 6:*

## **Optimal schemaläggning av produktionsceller**

**Karin Thörnblad**

Matematiska vetenskaper, Chalmers  
och Göteborgs universitet



**CHALMERS**



**GÖTEBORGS UNIVERSITET**



**Northern LEAD** | Chalmers tekniska högskola | 412 96 Göteborg | [www.northernlead.se](http://www.northernlead.se)  
**För mer information:** Karin Thörnblad | +46 520 29 22 66 | [karin.thornblad@gknaerospace.com](mailto:karin.thornblad@gknaerospace.com)

## Optimal schemaläggning av produktionsceller

I verkstäder med flexibla resurser är planering alltid en utmaning. Enkla prioriteringsregler såsom FIFO (first-in, first-out) leder ofta till ineffektiva lösningar. Karin Thörnblad beskriver i sin avhandling hur en nyutvecklad optimeringsmodell och -algorithm kan förändra detta. Hon har utvecklat en så kallad iterativ schemalägningsalgorithm som, baserad på matematisk optimering, på kort tid kan ta fram mycket bra planeringslösningar. I en fallstudie på GKN Aerospace i Trollhättan visar hon att algoritmen, med hjälp av operativa data från en produktionsverkstad, på 15 minuter tar fram robusta och nästan helt optimala scheman för det kommande skiftet.



**Karin Thörnblad** är doktor i matematik och arbetar på avdelningen för logistikstöd på GKN Aerospace. Under åren 2008–2013 har Karin studerat och utvecklat optimal schemaläggning som industridoktorand vid institutionen för Matematiska vetenskaper vid Chalmers tekniska högskola och Göteborgs universitet.



*Northern LEAD är ett kompetenscentrum för logistik, etablerat av Chalmers tekniska högskola och Göteborgs universitet, i samarbete med Logistik- och transportstiftelsen, LTS. Verksamhetens kärna utgörs av ett 80-tal forskare, forskarstudenter och lärare som arbetar i fem olika forskargrupper. Som en länk mellan akademi, industri och myndigheter verkar Northern LEAD för att stödja och sprida ledande forskning inom logistik och transport. Mer information: [www.northernlead.se](http://www.northernlead.se).*