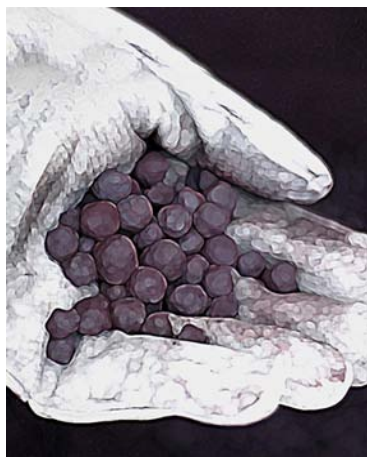


# JERNKONTORETS FORSKNING

KUNSKAPSÖVERSIKT

## Mer stål med mindre olja, el och kol

Teknikutvecklingen inom  
svensk stålindustri  
ur ett energiperspektiv



Utgivare: Jernkontoret, Avdelningen för forskning och utbildning  
Ingår i slutrapporteringen av forskningsprogrammet "Jernkontorets Energiprogram 2006–2010" med anslag från Energimyndigheten.  
Författare: Robert Vikman, Anna Ponzio  
© Jernkontoret  
Distribution: Jernkontoret, Box 1721, 111 87 Stockholm, tfn 08-679 17 00  
[www.jernkontoret.se](http://www.jernkontoret.se)  
Utgivningsdatum: januari 2011  
Jernkontorets rapport nr D840

# Sammanfattning

Energi är en av de viktigaste råvarorna för stålindustrin. Därför har teknikutvecklingen inom branschen och energieffektiviseringen gått hand i hand. Sedan den moderna stålindustrins födelse i mitten av 1800-talet har branschen effektiviserats enormt. Mellan 1920 och idag har energianvändningen per ton råstål minskat med nästan 80 %.

De svenska stålföretagen är idag kraftigt nischade mot marknadssegment där stålets kvalitet och service kring stålprodukten är avgörande. 90 % av den svenska stålproduktionen går på export. De avancerade stål som produceras i Sverige kan ge stora energieffektiviseringar i användarled och vara avgörande för teknikutvecklingen i många branscher.

Stål kan produceras från malm eller skrot. Den malmbaserade produktionen är mer energikrävande i och med att koks används för att reducera malmens järnoxider till järn. Om man väljer att producera från malm eller skrot beror på flera faktorer. En är vilken typ av stål som ska produceras. Vissa stålsorter kräver en extremt hög renhet från föroreningsämnen som ansamlas i stålet när det recirkuleras, t.ex. koppar, nickel och tenn. En annan är givetvis tillgången: Trots att stål är världens mest återvunna material så räcker inte det insamlade skrotet. Stålkonsumtionen i världen är så stor att det måste in nytt järn från malm i kretsloppet. I Sverige är ungefär 60 % av produktionen malmbaserad.

Energianvändningen i den svenska stålindustrin uppgår till drygt 20 TWh per år. Den största energianvändaren är masugnen där koks används för att reducera malmens järnoxider till järn. Men stålindustrin använder också stora mängder el, gasol och olja.

Speciellt sedan 1980-talet – då stålindustrin genomgick en omfattande strukturrationalisering – har produktionen utvecklats mot specialstål som ofta är mer energikrävande att producera. Samtidigt fortsätter effektiviseringen. Detta har varit möjligt tack vare ett stort fokus på forskning och utveckling inom branschen.

För att kunna hävda i den internationella konkurrensen måste stålindustrin fortsätta med nischstrategier där man siktar in sig på stålprodukter med högt förädlingsvärde. Samtidigt ökar kostnaderna för råvaror och energi. Att utveckla och effektivisera processerna kommer därmed att vara fortsatt viktigt. Många förbättringar kommer att ske i befintliga processer för stålframställning men i framtiden kommer också nya processkoncept. Stora satsningar på tillämpad forskning i samarbete med industrin är viktigt.

# Innehållsföreteckning

Sammanfattning sid 3

Inledning sid 5

Svensk stålindustri och dess energianvändning sid 6

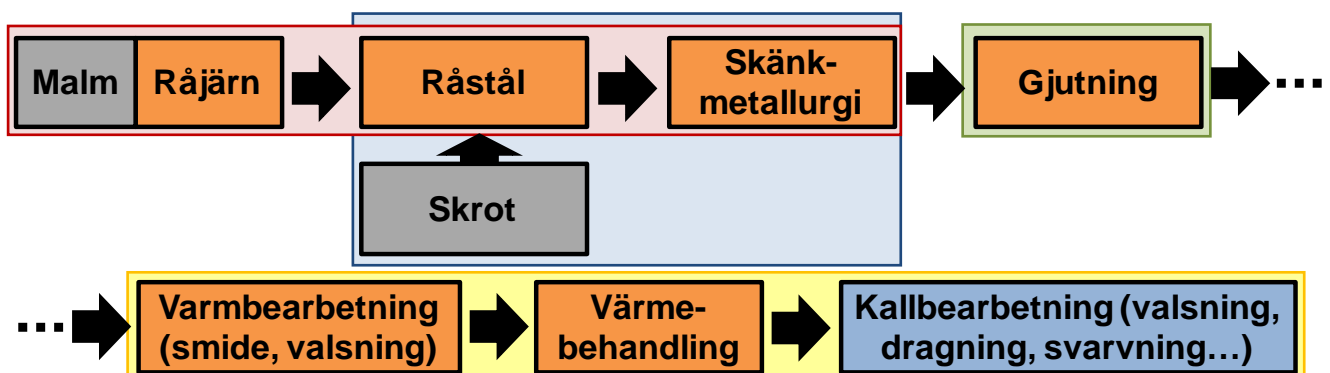
Malmbaserad tillverkning sid 10

Skrotbaserad tillverkning sid 13

Gjutning sid 16

Bearbetning och ugnsteknik sid 18

Slutsatser sid 22



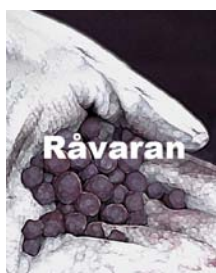
# Inledning

Energien har alltid varit och kommer alltid att förbli en av de viktigaste produktionsfaktorerna inom järn- och stålindustrin. I forna tider placerades järnverken vid forsar som gav vattenkraft och i skogsbygder med tillgång på bränslen för träkolstillverkning. Stålindustrin är en av de energiintensiva delarna av svenskt näringsliv och svarar för 15 % av industrins totala energianvändning.

Sedan flera sekler har den svenska stålindustrin verkat på den internationella marknaden och varit utsatt för hård konkurrens. Den har överlevt och utvecklats tack vare sin förmåga att anpassa sig till nya marknadsförutsättningar och tidigt ta till sig ny teknik. Detta gäller inte minst teknik för att effektivisera energianvändningen. Dagens svenska stålindustri är resultatet av en omfattande rationalisering och stålföretagen har specialiserat sig på nischprodukter, vilket lett till att man blivit världsledande på högförädlade produkter.

Att tillverka stål kräver stora mängder energi i alla delar av processen – energi som tillförs i form av kol, el, gasol och olja. Lägre energianvändning innebär både sänkta kostnader och mindre miljöpåverkan och stålföretagen ligger långt framme när det gäller att använda dagens bästa processteknik. Svensk stålindustri är energieffektiv i ett internationellt perspektiv.

*Denna skrift är tänkt att ge en översikt över teknikutvecklingen inom svensk stålindustri fram till idag, med speciellt fokus på teknikutveckling som påverkat energianvändningen.*



## Råvaran

Råvaran till det svenska stålet är huvudsakligen järnmalm i form av pellets med hög järnhalt från gruvorna i Malmberget och Kiruna. Stålskrot är också en viktig råvara i många processer. Stål är världens mest återanvända material – det kan återanvändas hur många gånger som helst.



## Energien

Energien i form av el, kol, olja och gasol tillförs under tillverkningsprocessen; den används för uppvärmning när stålet smälts, till att driva valsverk och i många andra delprocesser. Den tillförda elenergin i svenska stålföretag kommer till stor del från vattenkraft och kärnkraft, energikällor som inte orsakar några koldioxidutsläpp. Dessutom tas överskottsenergi från processerna tillvara och blir till el- och värmeenergi.



## Processen

Processen kan utvecklas till att bli mer energisnål längs flera vägar. En är att effektivisera varje delprocess i tillverkningen; att förkorta processtiderna, minska energianvändningen i varje steg och öka materialutbytet. En annan viktig förändring är att minska beroendet av koks när malmen förädlas till råjärn i masugnen. Genom att effektivisera användningen av koks samt finna metoder att ytterligare öka kolinjektionen i masugnarna kan koksåtgången och därmed koldioxidutsläppen minskas.



## Produkten

Produkten där stålet kommer till användning bidrar ofta till att minska energianvändningen i samhället. Avancerade, starka stål används för att tillverka lätta, starka och energieffektiva produkter. De avancerade stål som görs i Sverige har mycket stor betydelse för att minska energianvändningen inom många sektorer världen över. Det gäller inte minst inom transportsektorn där lätta och starka fordon minskar bränsleförbrukningen och ökar lastförmågan avsevärt.

# Svensk stålindustri och dess energianvändning

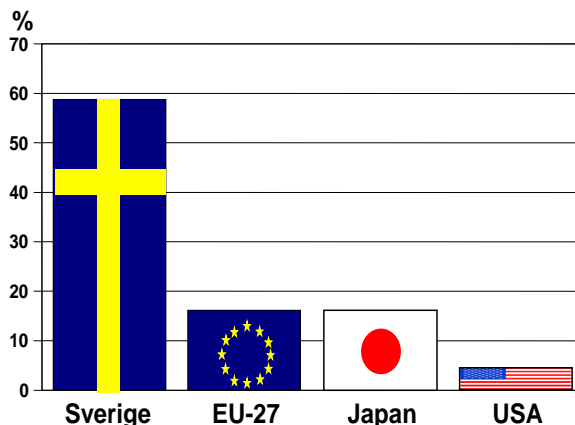
## Lättare, smartare och starkare!

Visste du att skalet till din i-phone är pressat i stål från Hagfors i Värmland? Eller att du vid en krock skyddas av en sidobalk i stål från Luleå och Borlänge om du färdas i en Ford Focus? Visste du att världens första kvaskristallina stål producerades i Sandviken? Eller att det kullagerstål som produceras i Hofors håller att snurra minst 1 000 000 000 varv?

Detta är några exempel på de avancerade stål som tillverkas i den svenska stålindustrin. Stål som säljs till cirka 150 länder. Så mycket som 90 % av den svenska stålproduktionen går på export, mest till Europa och USA men exempelvis Kina är en viktig tillväxtmarknad.

## En samling världsledande nischaktörer

Karakteristiskt för de svenska stålföretagen är att de är kraftigt nischade mot specifika marknadssegment där stålets kvalitet och service kring stålprodukten är avgörande. De flesta av företagen är världsledande inom sina respektive segment och den svenska produktionen utmärker sig i ett internationellt perspektiv genom en mycket hög andel legerade stål (omkring 60 %). Stål legeras för att få speciella egenskaper. Den höga andelen legerade stål inom svensk industri är en konsekvens av att svensk produktion till stor del fokuserar på specialstål med mycket hög prestanda. Enklare produkter med stora tonnage som exempelvis räls och armeringsjärn tillverkas inte längre i Sverige utan importeras. Sverige importerar enklare standardstål och exporterar högfördelat specialstål!



Andelen legerade stål av total råstålsproduktion (2010).

## En modern industri med lång tradition

Stålindustrin har en lång tradition i Sverige. Förekomsten av malm, stora skogar och tillgången till vattenkraft i forsar gjorde att järnbruken i huvudsak förlades till Mellansverige, "Bergslagen", där än idag det stora flertalet av de svenska stålproducenterna ligger. Sverige var vid 1700-talets första hälft den största järnexportören på världsmarknaden. Under 1800-talets industrialisering blev järnbruken och stålproducenterna färre och allt effektivare. 1900-talet karakteriserades av en kontinuerlig teknikutveckling som tog stålindustrin till en modern produktion. Den nischning av branschen som vi idag ser är resultat av en strukturomvandling som följde i oljekrisens spår. Idag finns i princip ingen konkurrens mellan de svenska stålföretagen, vilket underlättar forsknings-samarbete och erfarenhetsutbyte.

Produkt	Företag	Marknadsläge
Rostfritt stål	Sandvik Materials Technology Outokumpu Stainless Outokumpu Stainless Tubular Products Fagersta Stainless Carpenter Powder Products	störst på sömlösa rör ledande på rostfri plåt och höglegerade specialstål en av de största på svetsade rör för processindustrin bland de ledande specialisterna på valstråd i Europa störst på pulverstål
Verktogsstål	Uddeholm	störst
Snabbstål	Erasteel Kloster	störst
Kullagerstål	Ovako	störst
Handelsstål	SSAB EMEA Höganäs Sandvik Heating Technology	ledande på extra höghållfasta stål och störst på slitstål störst på järnpulver störst på järnlegeringar för motståndsvärmning

## Malm eller skrot

Stål kan produceras från järnmalm eller skrot. Om utgångsmaterialet är malm används den så kallade syrgasmetoden. Först reduceras järnoxiden i malmen till järn i en masugn. Det finns tre masugnar i Sverige, två i Oxelösund och en i Luleå. Reduktionen sker med hjälp av koks. Efter masugnen vidarebehandlas råjärnet i en syrgaskonverter till råstål.

Om utgångsmaterialet är skrot, smälts skrotet direkt till råstål i en ljusbågsugn. I Sverige finns ett tiotal ljusbågsugnar. Energikällan är el.

Om man väljer att producera från malm eller skrot beror på flera faktorer. En är vilken typ av stål som ska produceras. Vissa stålsorter kräver en extremt hög renhet från föroreningsämnen som ansamlas i stålet när det recirkuleras, t.ex. koppar, nickel och tenn. En annan är givetvis tillgången: Trots att stål är världens mest återvunna material så räcker inte det insamlade skrotet. Stålkonsumtionen i världen är så stor att det måste in nytt järn från malm i kretsloppet.

Råstålet – oavsett om det kommer från malm eller skrot – justeras i olika steg tills rätt sammansättning nås (skänkmetsallurgi) varpå det gjuts. Efter gjutningen genomgår stålet en rad olika bearbetningsoperationer och värmebehandlingsoperationer. Hur dessa ser ut är helt beroende av vilket stål som ska produceras.



Foto: LKAB  
Järnmalmspelletts och skrot blir stål.

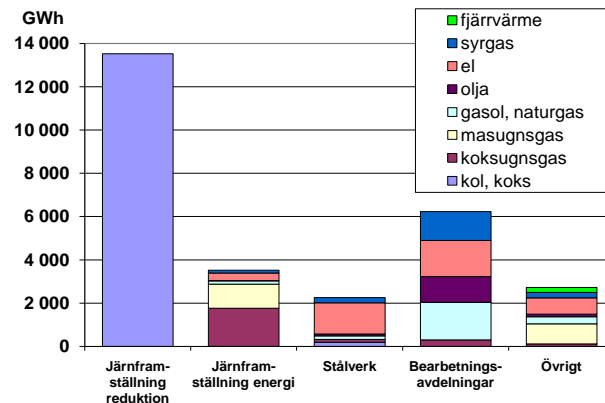
## Energien är en viktig råvara

För stålindustrin är energi en av de viktigaste råvarorna. Den räknas som energiintensiv och står med sina dryga 20 TWh för 15 % av industrins energianvändning.

Det helt dominerande energislaget är kol och koks som används i masugnarna. Koksens roll i masugnen är primärt som reduktionsmedel för att reducera malmens järnoxid till järn. Näst därefter kommer el som dels används för att smälta skrot i de verk som utgår från skrot istället för malm som råvara, dels för elvärmning, motordrift, belysning o.s.v. Industrin använder också stora mängder gasol och olja, framför allt i värmnings- och värmebehandlingsugnar.

Ur energisynpunkt är de malmbaserade eller integrerade järnverken med masugnar och stålverk med syrgaskonverter helt dominerande. Mellan 60 och 80 % av den totala

energianvändningen inom ett malmbaserat järnverk är knuten till masugnprocessen. För att producera ett ton göt och ämnen åtgår för den malmbaserade produktionen cirka 4600 kWh/ton och för skrotbaserad ca 900 kWh/ton (Jernkontorets energistatistik).



Stålindustrins energianvändning i olika processteg (2008).

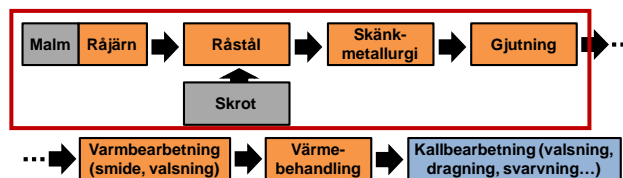
## Effektiviseringen av branschen

Svenska stålföretag har under lång tid gjort stora insatser för att minska energianvändningen. Samtidigt som de producerade volymerna ökat har energianvändningen blivit effektivare. Den effektiva och resurssnåla produktionen har, förutom fokuseringen på avancerade nischprodukter, varit en av de faktorer som gjort stålverken internationellt mycket konkurrenskraftiga. Viktigt för effektiviseringen av branschen har givetvis den teknikutveckling som ägt rum under 1900-talet varit.

### Att mäta energieffektiviseringen av branschen

Kan man säga något om hur stor effektiviseringen av svensk stålindustri varit mellan exempelvis 1970 och 1990 och mellan 1990 och 2010? Det enkla svaret är: Visst, något kan man säga. Man kan till exempel enkelt räkna energianvändningen per ton producerat råstål. Men speglar det verkligen effektiviseringen av branschen?

Länders produktion och förbrukning av stål anges ofta i termer av just råstål, med vilket avses göt och gjutna ämnen klara för vidare bearbetning (se figur nedan). Så även i Sverige. Råstål tillverkas i Sverige på två sätt: Via syrgasmetoden eller via ljusbågsugn. I ljusbågsugnen används uteslutande skrot, som smälts med hjälp av el. I syrgasprocessen används cirka 20 % skrot och 80 % råjärn, som i sin tur tillverkas i masugn.

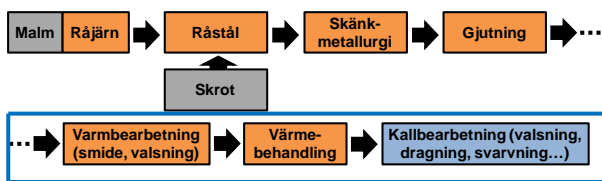


Råstål är i statistiken desamma som "göt och gjutna ämnen", klara för vidare bearbetning. Råstållstillverkningen stod 2010 för två tredjedelar av industrins hela energianvändning.

Med den fördelning av råstål tillverkat i syrgasprocess respektive i ljusbågsugn som rådde i Sverige år 2010 står

tillverkningen av råstål för omkring två tredjedelar av branschens totala energianvändning. Av energianvändningen fram till råstål står råjärnstillverkningen från malm (masugnen) för nära 90 %. Det betyder att syrgasmetoden är betydligt mer energikrävande än ljusbågsugnen. Den svenska stålindustrins totala energianvändning är alltså starkt beroende av andelen råjärn i råstålstillverkningen. Detta måste man kompensera för när man räknar på effektiviseringen av branschen.

En tredjedel av energin används dock i senare processteg som värmebehandling respektive varm- och kallbearbetning, samt till verksinterna transporter, uppvärmning och annat (se figur nedan). Dessa processteg ser helt olika ut beroende på vilken typ av stål som tillverkas. Förändras produktprogrammen, förändras därför energianvändningen, oaktat om processerna effektiviserats eller ej. Detta måste man också kompensera för om för att kunna dra slutsatser om effektiviseringen.



Processtegen nedströms gjutningen stod 2010 för en tredjedel av branschens hela energianvändning. Energiförbehovet för olika produkter och processvägar skiljer sig väsentligt.

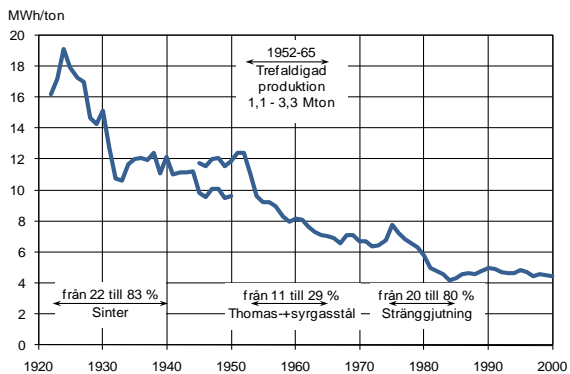
Det primära problemet för att räkna på effektiviseringen nedströms gjutningen är att det inte finns statistik på vilka stål som tillverkas, och i vilka mängder, på den detaljnivå som behövs. Den statistik som samlas in globalt, liksom i Sverige, omfattar som regel endast försåld mängd handelsfärdigt stål. Handelsfärdigt stål är ett samlingsbegrepp som inkluderar allt stål som är klart att säljas indelat i ett antal huvudproduktgrupper.

Mängden försåld handelsfärdigt stål är inte heller densamma som mängden tillverkat handelsfärdigt stål. Stål kan exempelvis ligga i lager eller passera distributörer över ett årsskifte. Dessutom går flöden av halvfabrikat mellan de olika stålverk och att få ett säkert grepp om alla sådana flöden skulle kräva att detaljerad samlades in och sammanställdes. Om ens möjligt skulle detta vara mycket arbetskrävande.

Det bästa sättet att analysera effektiviseringen av branschen är alltså att sammanväga olika bräkningar, alltifrån hur den totala energianvändningen varierat mot olika räknobaser, till hur den specifika energianvändningen varierat i ett visst processavsnitt. Nedan följer ett antal exempel.

### Energianvändning per ton råstål

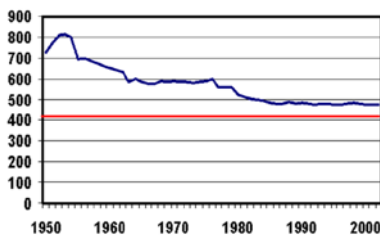
Under 1900-talet genomgick stålindustrin en enorm teknikutveckling med flera tekniksprång. Denna teknikutveckling resulterade i en kraftigt sjunkande energianvändning. Den effektivisering av branschen som ägde rum under 1900-talet åskådliggörs på ett bra sätt genom att jämföra energianvändningen med produktionen av råstål.



Utvecklingen av det specifika energibehovet för tillverkning av stål under 1900-talet

### Allt närmare de teoretiska gränserna

Kol- och koksanvändning, kg/ton råjärn



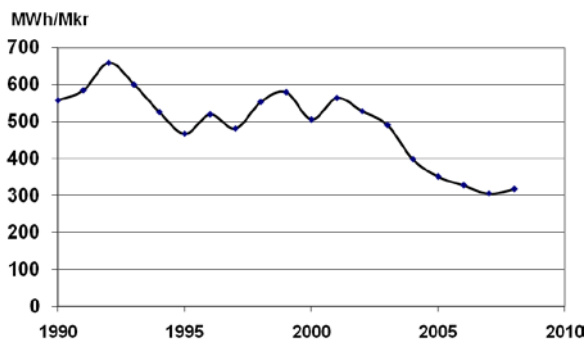
Effektivisering av svenska masugnar närmar sig teoretisk gräns (röd).

Ju mer de kemiska processerna närmar sig de teoretiska gränserna för masugnsprocessen, desto mindre blir möjligheterna till effektivisering. Marginalerna att "ta av" blir helt enkelt mindre. Detta illustreras tydligt av hur

koksförbrukningen per ton råstål i svenska masugnar förändrats under senare delen av nittonhundratalet.

### Energianvändningen per krona rörelseintäkt

Ju mindre effektiviseringen är, desto större blir genomslaget för den typen av osäkerheter som diskuterats ovan. Sedan mitten av 1980-talet har energianvändningen per ton producerad råstål inte sjunkit nämnvärt. Detta innebär dock inte att effektiviseringen av branschen stannat av – tvärtom! Genom att jämföra energianvändningen med industrins rörelseintäkter, som i någon mån speglar stålens förädlingsvärde, illustreras denna effektivisering.



Effektiviseringen av branschen mellan 1990 och 2010 mätt som energianvändning per krona rörelseintäkter.



## Stål som effektiviserar i användarled

Att producera stål är energikrävande och ju mer avancerade stålen blir desto mer desto mer energikrävande blir produktionen. De avancerade stål som produceras i Sverige kan dock ge stora energieffektiviseringar i användarled och kan vara avgörande för teknikutvecklingen i många branscher.

### Kraftigt minskade utsläpp

Med höghållfasta stål kan en funktion, t.ex. krocksäkerhet, uppnås med mindre mängd material och lägre vikt än vid användning av konventionella stål. För rörliga konstruktioner, som bilar, kan den minskade vikten leda till bränslebesparingar som i koldioxidekvivalenter motsvarar fyra gånger den emission som uppkommer vid själva ståltillverkningen! För fasta konstruktioner, som containrar och cisterner, ger höghållfasta stål främst en materialbesparing, men även denna ger emissionsminskningar på upp till 50 % i ett livscykelperspektiv.



Genom att ersätta konventionellt stål med höghållfast stål kan bilen göras lättare vilket minskar bränsleförbrukningen.

### Förnyelsebar energi kräver avancerade stål

Vind, sol och biobränsle byggs ut. För att utveckla dessa tekniker mot högre effektivitet eller lägre produktionskostnader kan stålets kvalitet i vissa komponenter vara avgörande. För att kunna bygga högre vindkraftverk måste maskindelen klara de påfrestningar de utsätts för. För att öka temperaturen i biobränsleanläggningar behöver man än bättre korrosionsbeständighet på stål i rör och reaktorer medan ett substrat i stål istället för keramiska material kan ge billigare solceller.



Ju högre vindkraftverken blir, desto högre blir påfrestningarna på maskindelen. Detta ställer höga kvalitetskrav på det stål som används.

## Restenergier blir fjärrvärme

I stålindustrins högttemperaturprocesser bildas stora mängder restenergier. I första hand utnyttjar man dessa för att värma lokalerna. Successivt har stålverken blivit inkopplade i kommunernas fjärrvärmenät för leverans av restenergier. Sedan 1980-talet har försäljningen av restenergier från stålindustrin ökat med 100 %.

### Energieffektivisering i fyra dimensioner

Energieffektivisering handlar om mer än utveckling av huvudprocesserna. Kring huvudprocesserna finns också stödprocesser, alltifrån pumpar och tryckluft till belysning. Även om stödprocesserna inte använder lika mycket energi som huvudprocesserna, kan effektivisering av dem göra stor skillnad. Ofta handlar det då om att implementera kommersiell teknik. Men framför allt engagera alla i företaget i arbetet med att söka efter energitjuvarna! Vad som händer med restprodukter och restenergier samt vilken effektivisering produkterna kan åstadkomma i användarled har också stor betydelse ur ett system- och livscykelperspektiv.



#### Effektivisering av huvudprocesserna

- ✓ Långsiktig forskning och teknikutveckling
- ✓ Stora energier ger möjlighet till stora effektiviseringar

#### Effektivisering av stödprocesserna

- ✓ Organisation/arbetsätt för att skapa "Eldsjälar"
- ✓ Små energier men tillsammans gör insatserna skillnad: "Många bäckar små"

#### Ta vara på restprodukter och restenergier

- ✓ Positiv attityd, stödjande styrmedel
- ✓ Utbyte med andra branscher

#### Produkter som effektiviserar

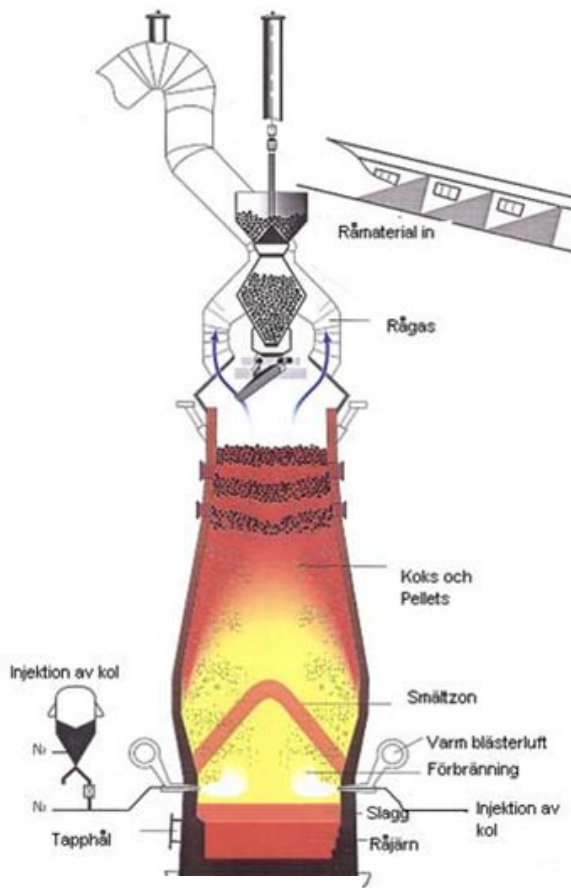
- ✓ Avancerade stål effektiviserar energianvändningen i slutprodukten och möjliggör ny energiteknik

# Malmbaserad tillverkning

Vid malmbaserad tillverkning framställs stål huvudsakligen av flytande råjärn från masugnen men även en mindre del skrot tillsätts – cirka 20 % av insatsen. Kolhalten reduceras därefter genom färskning med syrgas i en LD-konverter. Den nödvändiga energin för temperaturhöjningen erhålls ur färskningsreaktionerna. Under processen bildas slag av de icke gasformiga reaktionsprodukterna och av tillsatta slaggbildare, som t.ex. bränd kalk.

## Masugnsprocessen

I järnverkets masugn – ett högt tegelinfodrat schakt – sker reduktion av malm till järn i en motströmsprocess genom att syret tas bort ur de oxidiska järnmineralerna med hjälp av koks och koloxid. Det så kallade råjärnet från masugnen innehåller förutom järn också 4-5 % kol och mindre halter av andra ämnen. Råjärnet går sedan vanligen i flytande form vidare till stålverket. I Sverige finns masugnar vid SSAB:s anläggningar i Luleå och Oxelösund. 60-65 % av världens stålproduktion sker via den malmbaserade vägen. I Sverige är samma siffra omkring 60 %.



Masugn i genomskärning.



Människa och maskin i samspel för energihushållning.

## Järnsvamp

På många håll i världen utgör järnsvamp ett komplement till skrot som basmaterial vid stålframställningen. Järnsvamp tillverkas genom att vid lägre temperaturer avlägsna järnmalmens syre med hjälp av koloxid och vätgas som framställts ur naturgas.

I Sverige tillverkas järnsvamp av Höganäs AB med kol som reduktionsmedel enligt Höganäs järnsvampprocess. Produktionen är uteslutande avsedd för Höganäs egen produktion av högklassigt järnpulver.

## Råjärnsbehandling och råstålstillverkning

Det flytande råjärnet från masugnen innehåller förutom > 4 % kol även relativt höga halter av både fosfor och svavel. Svavlet avlägsnas genom en förbehandlingsprocess som utförs i överföringskärl, skänk eller så kallad torped, mellan masugn och konverter. I LD-konverttern färskas järnet, d.v.s. kolet avlägsnas, med hjälp av syrgasblåsning. Under färskningen oxideras också fosfor och övergår till slaggen. Under färskningsprocessen utvecklas mycket värme vilket utnyttjas till att smälta in cirka 20 % skrot.

## Energianvändningen

75 % av energianvändningen inom järn- och stålindustrin utgörs av fossila bränslen, främst kol (koks) i masugnen och 25 % av el i elektrostålugnar, valsverk m.m.

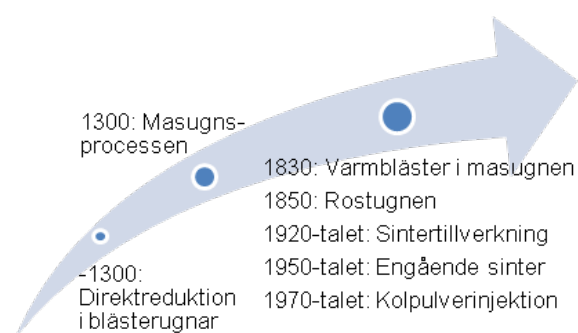
den höga andelen fossila bränslen, är miljöbelastningen vad gäller koldioxid från stålindustrin betydande. Övrig energikrävande förbrukning inom industrin utgörs av malmutvinning och transporter, tillverkning av legeringar samt tillverkning av bränd kalk och elfasta material.

Energirelaterad forskning och forskning om råvaruresurser är – och har alltid varit – nära kopplad till produkt- och processforskning. Speciellt för malmbaserad järnframställning har energifrågorna varit i fokus under alla tider. Skogsskövlingar i jakten på träkol har förändrat landskapet på många håll och senare tiders import av stenkol har varit kostsamt för de svenska verken.

Teknikutvecklingen inom järn- och stålindustrin karaktäriseras både av stora språng i form av nya processer och större eller mindre utvecklingssteg i de befintliga processerna. Ett antal tekniksprång har historiskt lett till förenklade processer och förkortade processkedjor som också medfört stora energibesparingar. Innovationer och processutveckling inom existerande teknikområden har gett fortsatta bidrag till energibesparingar.

## Svensk råjärnstillverkning – mest energieffektiv i Europa

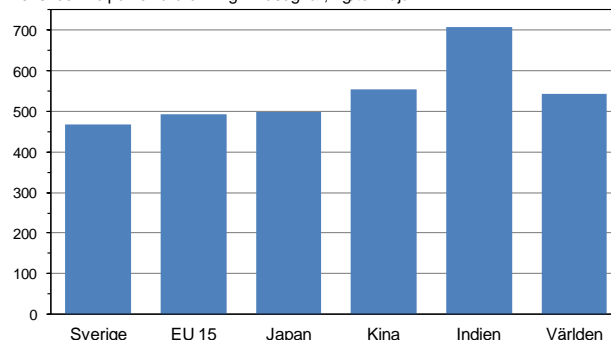
Masugnen utvecklades under 1100-talet och medförde att en långt högre produktion av järn än från tidigare blästerbruk möjliggjordes. Under medeltiden och fram till 1800-talets mitt förändrades vare sig masugnarnas konstruktion eller drift nämnvärt. I och med processförbättringar mellan 1850 och 1930, som att använda varm blästerluft, rostad malm och så småningom malmanrikning och sinter förbättrades energianvändningen radikalt. Fortsatta processförändringar; engående sinter, olje- och kolinjektion i formorna samt övergång till 100 % pelletsbeskickning har ytterligare förbättrat bränsleekonomin i masugnarna. Man brukar räkna med att under perioden 1850-1990 sjönk kolförbrukningen med två tredjedelar i svenska masugnar.



Allmänna mål med forskning kring masugnsdriften har varit att öka bränsleekonomin och minska koksförbrukningen och därigenom effektivisera processen. Forskningen de senaste åren har inriktats på förbättring av koks kvalitet, beskickningsteknik och ökning av kolinjektionen i masugnen. Vart och ett av projekten har inneburit en sänkning av den totala relativa kolförbrukningen med 1-2 %. Bränsleanvändningen, koks och injicerat kolkpulver, mätt som kg/ton råjärn, ligger för alla tre

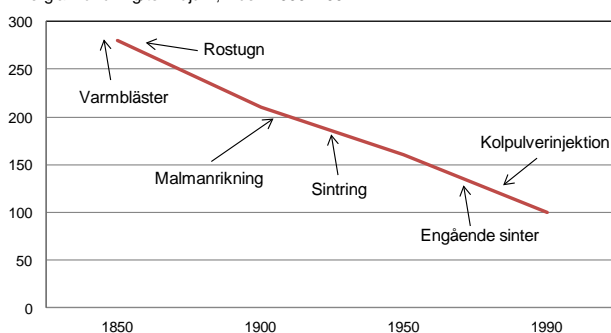
masugnar i Sverige bland de lägsta jämfört med de europeiska järnverken under 2000-talet. Detta innebär att de svenska masugnarna är mycket energieffektiva och har bland de lägsta koldioxidutsläppen i Europa.

Koks- och kolkpulverförbrukning i masugnar, kg/ton råjärn



Internationell jämförelse av kol- och koksanvändning i masugnar, kilo per producerat ton råjärn.

Energianvändning/ton råjärn, index 1990=100



Specifik energianvändning vid råjärnstillverkning mellan 1850 och 1990 kopplat till teknikutvecklingen.

## Råjärnsbehandling och färskningsprocessen

Utvecklingen av dagens teknik för råjärnsbehandling och färskning har liksom den för järnframställningen genomgått ett antal tekniksprång och utvecklingskedan. Under hela medeltiden tillverkades smidbart järn genom att tackjärnet under lufttillförsel hamrades i öppna eller täckta härdar. Under denna process avkolades smältstycket så att järnet blev smidbart. Produktionen och produktiviteten var låg och energiåtgången för att hålla smältstycket varmt under bearbetningen var hög. För att omvandla tackjärn till ett ton stångjärn åtgick över 6 ton träkol.

G.F. Göransson förvärvade 1857 en femtedel av Henry Bessemers patent för att i Sverige och Norge tillverka smidbart stål genom en färskningsprocess där luft blåstes genom det flytande råjärnet. Efter många försök lyckades man ett år senare att få processen att fungera, bland annat med stöd från Jernkontoret. Genom detta tekniksprång ökade möjligheterna att på ett billigt sätt tillverka smidbart stål. Samtidigt sjönk energianvändningen dramatiskt.

Den sura Bessemerprocessens svaghet var att järnet inte kunde raffinerats på vare sig fosfor eller svavel. I länder med fosforhållande malmer och med stenkol som reduk-

tionsmedel i masugnen var detta ett stort problem. Omkring 1880 utvecklades den så kallade Thomasprocessen som byggde på en basisk konverterinfodring. I denna process kunde de skadliga elementen avlägsnas.

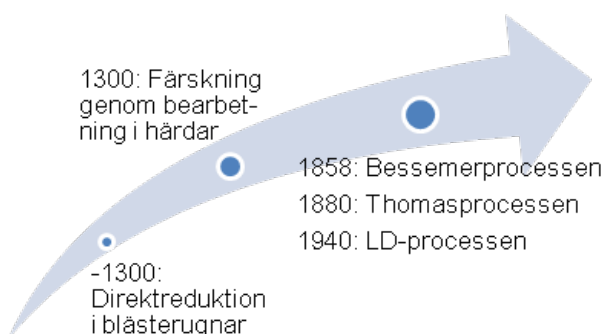
Luftfärskningsmetodernas stora nackdel var att skrot-smältningsskapaciteten i dem var låg. Processerna var tidskrävande och – i och med att luft användes för färskningen – fördes stora mängder kylande kvävgas genom smältan. Mot slutet av 1940-talet började LD- och Kal-doprocesserna utvecklas. Syrgas användes för att färskra råjärnet vilket gjorde processerna snabba. Bildad koloxid förbrändes i ugnsummet vilket medförde att 20-40 % skrot kunde smältas in.



Skrotinlastning i en LD-konverter hos SSAB EMMA

Under senare hälften av 1900-talet infördes ett steg mellan masugn och konverter, där råjärnet genom injektion behandlades med ett reagens (t ex magnesiumoxid, kalciumkarbid eller kalk) för att före konverterprocessen sänka svavelhalten och eventuellt även fosforhalten. Förbehandlingssteget medförde att stålprodukternas prestanda förbättrades och därigenom behövdes mindre materialmängder för att uppfylla avsedd funktion i olika tillämpningar, t ex broar, bilar.

Inom Jernkontorets forskning har ett flertal projekt med energieffektiviseringsinriktning inom råjärnsbehandlingsområdet bedrivits på senare år. Ett exempel är ett projekt som inriktats på en minskning av råjärnsförlusterna vid förbehandlingen. Projektet visade att det med en flussande mineral tillsats till kalciumkarbiden är möjligt att sänka råjärnsförlusterna väsentligt vid svavelrening i överföringsskänk. Genomförda försök har visat på en årlig besparing på 145 GWh. Råjärnsförlusterna är större vid svavelrening i torped och det är möjligt att införa samma teknik även i denna. Då råjärnsförlusterna minskar behöver mindre råjärn tillverkas vilket sänker koldioxidutsläppen med 50 kton/år.



Inom konvertermetallurgin har stora arbeten gjorts för att förbättra processsäkerheten, t.ex. genom att studera blåspraxis, d.v.s. lanshöjd, gashastighet, dysutformning, kalkupplösning m.m. De utförda projekten har lett till betydande energieffektiviseringar inom järn- och stålindustrin.

## Möjligheter

Den svenska tillgången på magnetitmalm ger förutsättningarna för den energieffektiva tillverkningsvägen från stål till malm, via pellets. En fortsatt utveckling av den malmbaserade tillverkningen kommer sannolikt att ha någon eller några av nedanstående inriktningar. Samtliga processförbättringar leder samtidigt till energibesparingar av olika storlek. Specifikt för masugnprocessen gäller följande områden för framtida forskning:

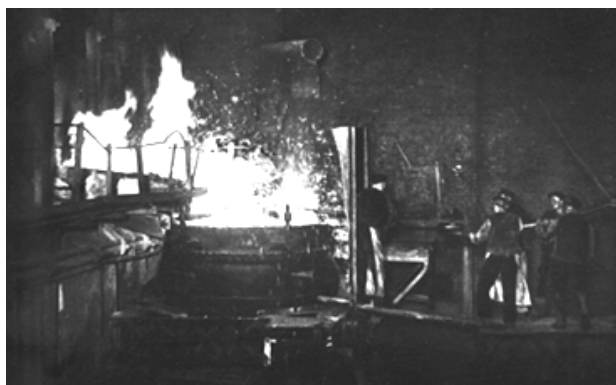
- Minskning av förlusterna i masugnen. Förlusterna utgörs till stor del av hyttsoet. Det grövre hyttsoetet kan återföras i processen genom att det ingår i briketter som chargerar på masugnen eller genom att det injiceras tillsammans med kolpulver. Alternativt kan det briketteras och reduceras i en roterugn.
- Helt nya processer för malmbaserad produktion. Inom EU-projektet ULCOS driver 48 partners i 15 länder utveckling av längs fyra teknikspår: Toppgasrecirkulation, smältning, direktreduktion och elektrolys. Målet är en halvering av koldioxidutsläppen.
- För råjärnsbehandlingen och färskningsprocessen gäller det för energieffektivitetens skull att minska råjärnsförlusterna, öka utbytet för olika reagens, återvinna energirika processgaser, styra konverterprocessen och att öka råstålskvaliteten för efterföljande processer.
- Användande av alternativa bränslen i masugnen, t.ex. biomassa.
- Öka reagentseffektiviteten vid förbehandlingen av råjärn. Endast cirka 15 % av den teoretiska potentialen för reagentset kalciumkarbid reagerar med svavel till kalciumsulfid
- Ökad gasåtervinning från LD. En energieffektiviseringspotential på 49 GWh/år finns.
- Dynamisk styrning av syrgasblåsning i LD, automatisering av blåsning, tillsatser mm. Med förbättrad mätteknik kan processen förbättras ytterligare.
- Effektivare slagstopning vid tappningen av LD genom t.ex. förhindrande av vortexbildning.
- Förbättrad bottenpolning som ger högre järnutbyte, kortare blåstid i konvertern samt lägre aluminiumanvändning vid desoxidation i skänken efter tappning.

# Skrotbaserad tillverkning

Vid skrotbaserad tillverkning framställs stål huvudsakligen med skrot som råvara. I så kallade ljusbågsugnar erhålls den nödvändiga energin för smältningen från ljusbågar mellan grafitelektroder och insatt skrot. Under processen, som oftast är syrgasunderstödd, bildas en slagg av de icke gasformiga reaktionsprodukterna och av tillsatta slaggbildare, som t.ex. bränd kalk.

## Martinprocessen

Behovet att smälta större mängder skrot uppkom strax efter införandet av konverterprocesserna, när stora mängder stål – och därmed även skrot – började cirkulera i samhället. På 1860-talet lyckades Pierre Martin att smälta stål med en gasflamma. Genom att växelvis värma tegelstaplar med avgaser för att sedan föra kall blästerluft genom dem och på så sätt förvärma luften kunde man få en så hög temperatur i ugnen att stålet smälte.

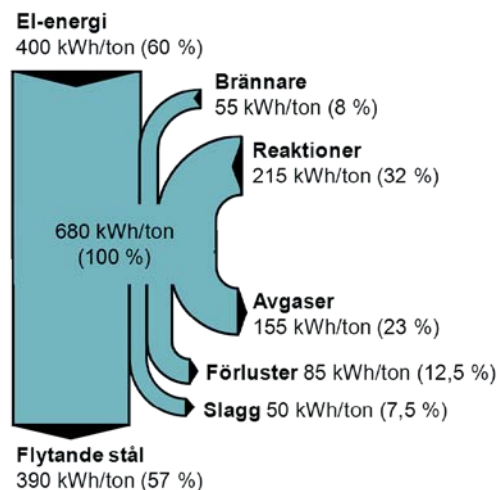


Tappning av sur Martinugn i Fagersta 1929.

Martinprocessen var från slutet av 1800-talet och fram till 1960 den huvudsakliga råstålstillverkningsmetoden i Sverige. Martinugnarna eldades med generatorgas, koksgas eller olja. I och med stigande oljepriser, dålig bränsleekonomi och låg produktivitet fasades de ur produktionen. De sista Martinugnarna i Sverige las ner i början av 1980-talet.

## Elektrostålprocesser

Elektriciteten inom stålsmältningen gjorde sitt inträde i början av 1900-talet. I Gysinge installerades 1905 en rännugn som drevs med elektricitet från det närliggande kraftverket i Gavleån. Tekniken från rännugnen utvecklades till en smältteknik där induktion utnyttjas till att smälta skrotet. Induktionsugnar står för en viss del av produktionen – framför allt i små verk – men den huvudsakliga skrotsmältningen sker fr.o.m. 1960-talet i ljusbågsugnar.



Energiflödesdiagram för ljusbågsugn.

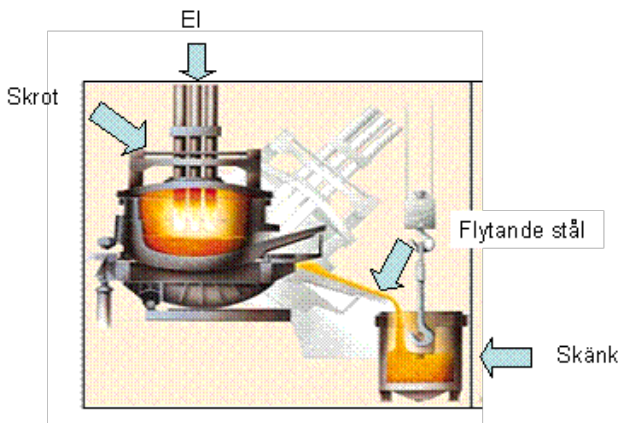
## Skänkmetallurgi

Skänkmetallurgin utvecklades kraftigt under 1960- och 70-talen då kraven på speciella materialegenskaper blev tydliga. Ett flertal metoder utvecklades för att åstadkomma renare stål och stål med förbättrade materialegenskaper:

- ✓ Desoxidation för sänkning av syrehalten.
- ✓ Värmning så att behandlingstidens längd kan anpassas till kvalitetskraven.
- ✓ Legering, grov- och finjustering av sammansättningen.
- ✓ Vakuumbehandling för avlägsnande av inlöst väte och kväve.
- ✓ Omröring för homogenisering av stålet med avseende på sammansättning och temperatur och inneslutningsavskiljning med gas, alternativt med induktion.
- ✓ Säker tillsats av reaktiva legeringselement (kol, svavel, titan, bor, som vid tillsats på annat sätt, t.ex. under tappning, skulle ha reagerat med slaggen och därigenom gått förlorade).
- ✓ Eventuell behandling med kalcium eller andra element för inneslutningsmodifiering.

## Energianvändning

Vid smältning i ljusbågsugnar övergår strålningsenergin från ljusbågarna till skrotet.



För att smälta ett ton järn och ge det en temperatur av 1600°C åtgår teoretiskt cirka 390 kWh. Detta är en siffra som sätter gränsen för vad som är möjligt enligt fysiken: Under den går inte att komma ens i en helt ideal process. En verklig process, till och med en energieffektiv sådan, ligger dock långt från en ideal sådan eftersom en verklig process har förluster av olika slag. En "normal" förbrukning i svenska verk är drygt 500 kWh/ton, exkl. kemiskt värme från oxidation genom syrgasblåsning. Utvecklingen av ljusbågsugnstekniken inriktades tidigt på att öka produktiviteten i ugnarna. Genom att korta smälttiden minskades också energiförlusterna.

1960- och 70-talen: Injektions-tekniken utvecklas. Ca-behandling av Al-desoxiderade stålsorter. S-raffinering i gjutskänk blir möjlig.

1980- och 90-talen: Skänkmetsallurgin integreras tydligare i materialutvecklingen

1950-talet: Skänkkugnar och vakuumavgasning utvecklas



Tappning av ljusbågsugn

Exempel på steg inom produktivtets- och energieffektivtetsutvecklingen är transformatorer med högre effekt, förbättrad ugnsgesign (vattenkylda paneler och valv) samt skumslagspraxis för att kunna driva ugnen med hög effekt, d.v.s. hög spänning.

Inom Jernkontorets forskning har ett flertal projekt med stor energibesparingspotential drivits som t.ex. "Statistisk analys av skrot och power-off tid".

## Stål med allt högre prestanda tack vare utvecklingen inom skänkmetsallurgi

Den direkta energianvändningen under skänkbchandlingen är, i jämförelse med smältningsoperationen, ganska liten. Den avgörande effekten på energianvändning som skänkmetsallurgin har är den som uppkommer i efterföljande steg, genom förbättrade materialegenskaper eller förbättrad gjutbarhet.

Inom skänkmetsallurgin har omröringsteknik införts och förfinats, vakuumteknik introducerats och mätmetoder utvecklats som alla tillsammans har medfört att stora tekniska framsteg vad gäller materialegenskaper har kunnat göras. Stålsorter med extremt låga halter av kol, svavel, kväve, syre och väte har kunnat tillverkas. Detta har bland annat lett till att hållfastheten har ökat kraftigt och därigenom har materialbehovet för applikationer minskat radikalt.

Utbyteshöjning i processen – och i efterföljande processer – har ett direkt genomslag på produktivitet och energieffektivitet. De tillsatser av aluminium som görs för att sänka syrehalten och därigenom bidra till att ett renare stål tillverkas, ger som bieffekt upphov till mikroskopiska partiklar av aluminiumoxid som riskerar att agglomereras och täppa till gjutkanaler m.m. och därigenom orsaka avbrott under gjutningen. Behandling av sådana aluminiumdesoxiderade stål med kalcium gör att de rena och fasta aluminiumoxiderna transformeras till flytande kalciumaluminater som inte fastnar i gjutkanalerna.

På skänkmetsallurgisidan har forskningsarbetet främst inriktats på att minska mängden skadliga icke-metalliska inneslutningar samt att öka gjutbarheten genom att begränsa mängden inneslutningar som sätter igen gjutrören vid stränggjutning, t.ex. för stålsorter som innehåller cerium.

1902: Ljusbågsugns-tekniken införs

1970-talet: Skumslagspraxis

1980-talet: Syrgasundersstödd smältning i LB-ugnen.

1860: Martinprocessen

## Möjligheter

Eftersom verkningsgraden för tillförd energi i en ljusbågsugn endast är 50-60 %, finns stora möjligheter till framtida energieffektiviseringar. Ljusbågsugnens energiförluster är tidsberoende vilket innebär att förluster uppkommer även om ugnen körs med låg smälteffekt eller står stilla. De utvecklingsbehov som finns utgår därför ofta från produktivitetshöjningar. Även andra åtgärder som förbättrad mätteknik kan minska energiförlusterna.

Energieffektiviseringsforskningen inom den nära framtiden kommer sannolikt att inriktas mot områden som syftar till att öka produktiviteten samt minska värme- och materialförlusterna under smältningen. De skänkmatalurgiska operationerna kommer att förbättras så att stålets renhet ökas ytterligare. Exempel på tänkbara forskningsområden är:

- Upplastningsstrategier för att skapa bra smältförhållanden, d.v.s. hur ska korgarna lastas och ugnen beskickas för att få bästa resultat? Och hur ska långsiktiga

beskickningsstrategier utformas för att på bästa sätt tillvarata den viktiga skrotresursen i samhället?

- Vidareutveckling av mätteknik för snabb analysering av ugnsgaser samt implementering av teknik för efterförbränning i ugnsrummet. Effektiv förbränning i ugnsrummet ger möjlighet till direkt besparing av elenergi mellan 20 och 100 kWh/ton beroende på verk, motsvarande 40-200 GWh/år i Sverige.
- Fortsatt utveckling av skumslaggteknologi för smältning av rostfritt och höglegerat stål genom tillsats av gasalstrande briketter i ugnen.
- Fortsatt utveckling av stålets renhet vad gäller icke-metalliska inneslutningar och halter av lösta gaser.
- Tid- och temperaturstyrning till ökad precision för att minska energianvändningen.
- Fortsatt forskning för att minska igensättningar vid gjutning av igensättningsbenägna stålsorter.



# Gjutning

Gjutning är en mycket gammal process som under mänsklighetens historia har tillämpats för en mängd metaller och legeringar med relativt låga smältpunkter, t.ex. bly, brons och guld. Stål, som har en hög smältpunkt, lärde man sig gjuta först i mitten av 1800-talet i takt med att man började tillverka flytande stål. Därigenom blev gjutning ett processteg bland övriga inom stål-tillverkningen, smältning, valsning m.m.

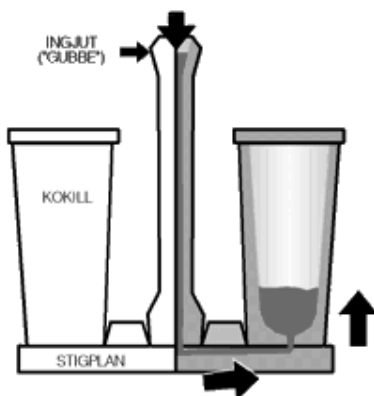
## Götgjutning

Den ursprungliga metoden att gjuta stål är så kallad fallgjutning. Vid denna process fylls en form (kokill) genom att det smälta stålet hålls rakt ner i den.

Vid så kallad stiggjutning fylls stålet på i ett ingjutsystem och leds via kanaler underifrån in i kokillerna. Detta gjutförfarande gör att fler kokiller kan fyllas samtidigt. Stiggjutning lämpar sig därför bättre än fallgjutning för storskalig produktion. Genom att stålytan i kokillerna stiger relativt sakta och utan stänk och luftnerdragningar fås också bättre götytor och ett renare stål än vid fallgjutning.

Vid götgjutning bildas på grund av stelningskrampningen en så kallad pipe i toppen av götet, som alltid måste avlägsnas vid valsningen. Götdelen med pipe utgör 10-20 % av götets vikt.

Under gjutningen tillsätts gjutpulver för att förbättra götytorna genom smörjning mellan göt och kokill. Gjutpulvret skyddar också stålytan från luftens syre. Mot slutet av gjutningen tillsätts också ett täckmedel som tillsammans med fiberplattor kring göttoppen skyddar stålet från värmeförluster och på det sättet minskar pipens storlek.



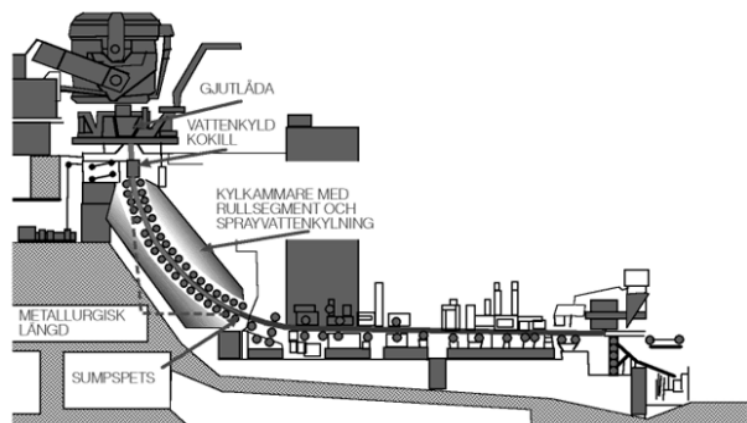
Princip för stiggjutning av göt.

## Stränggjutning

Det stora tekniksprånget inom gjuttekniken kom genom införandet av stränggjutning. I och med denna process blev det möjligt att kontinuerligt gjuta en eller flera charger i taget. Härigenom ökade materialutbytet med 10-20 % – i och med att pipens andel av det gjutna materialet minskade. Dessutom innebar stränggjutningen att ett eller flera – också materialutbytessänkande – valsningssteg kunde undvikas.

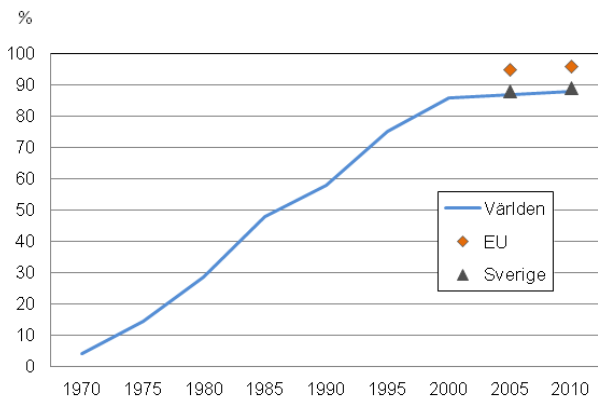
Redan Henry Bessemer hade 1850 en idé om att gjuta stål direkt till band. De tekniska problemen var dock för svåra för att idéen skulle komma att kommersialiseras. 1943 gjordes pilotskalförsök i Tyskland med stränggjutning av stål och i Sverige gjordes de första tillämpningarna av tekniken vid Nyby, Halmstads järnverk och Motala Verkstad i slutet av 1950-talet och början av 1960-talet. Det var dock inte förrän i mitten av 1960-talet som viktiga utvecklingssteg togs och som gjorde att processen fick sitt verkliga genomslag. Två av dessa var införande av ett gjutpulver samt oscillering av kokillen under gjutningen. Det smälta gjutpulvret hade en smörjande och värmeledande effekt mellan kokillen och strängskalet. Den, under 1930-talet uppfunna oscillerande kokillrörelsen, minskade friktionen mellan skal och kokillvägg och hjälpte till att föra ner gjutpulvret i kokillen. Dessa två steg gjorde att svåra problem som fastbränningar i kokillen och genombrott, d.v.s. att det gick håll på skalet så att stålet rann ut, kunde undvikas.

Stränggjutningstekniken har sedan 1960-talet gradvis ersatt götgjutningen och stod 2010 för nära 90 % av världens ståltillverkning. I Sverige götgjuts 2010 drygt 11 % av det totala tonnaget. De stålsorter som fortfarande götgjuts är sådana som på grund av sin segringsbenägenhet eller sprickkänslighet inte anses vara lämpade för stränggjutning.



Stränggjutningsmaskin.





Andel stränggjutet stål av den totala stålproduktionen i världen, EU respektive Sverige.

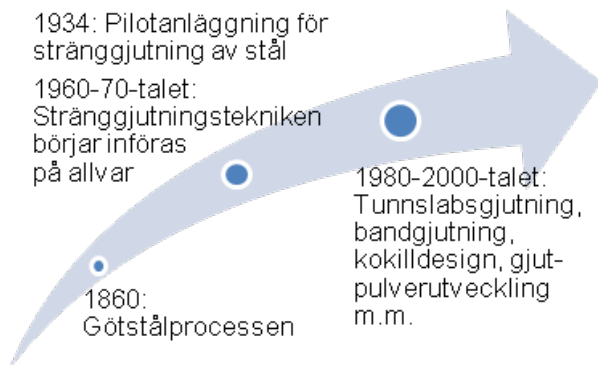
## Energianvändning och forskningsfokus

Den energi som förbrukas under gjutningsprocessen är mycket liten i förhållande till smält- eller värmningsprocesserna. För stränggjutningsprocessen ligger i stället energibesparingspotentialen i att stålet ges en form som ligger närmare slutproduktens och att ett eller flera valssteg undviks.

Forskningen inom gjuttekniken har inriktats på att förstå stelningmekanismerna, hur de olika elementen fördelas i det gjutna ämnet under stelningen och hur materialutbytet under såväl gjutningsprocessen som under efterföljande processteg ska kunna ökas.

Ett speciellt viktigt forskningsområde för götjutningstekniken har varit gjutpulvrets betydelse för götens ytstandard samt för att förstå hur det påverkar värmeisoleringen i kokillen. Såväl gjutpulvrets sammansättning och termiska egenskaper som dess tillsättningsätt har studerats.

Inom stränggjutningstekniken har fokus också legat på forskning kring gjutpulvrets egenskaper. Dess betydelse för gjutresultatet kan knappast överskattas. Kokillens utformning för att motverka stelningsskrumpning och uppkomst av sprickor (inre, yttre och i hörnen), inverkan av omröring under gjutningen samt en ökad automatiseringsgrad har lett till att kvaliteten på det gjutna materia-



let har ökat. Den ökade kvaliteten har i sin tur lett till att andelen stränggjutet stål har ökat. Stora besparingar av energi för värmning av göt och ämnen samt minskat behov av smältning har därmed kunnat göras. En jämförelsesiffra som kan nämnas är att för varje ton götjutet material som överförs till stränggjutning görs en energibesparing på 1000 kWh vilket ger en total årlig svensk besparingspotential på mer än 500 GWh.

Inom Jernkontorets gemensamma forskning har ett flertal projekt genomförts med direkt och indirekt inverkan på energihushållningen.

I projekt som har inriktats på ökad produktivitet vid stränggjutningen och gjutning av segringskänsliga stålsorter har mycket innovativt arbete lagts på utformning av själva stränggjutningskokillen. Projektresultaten har bland annat lett till att vissa stålsorter som tidigare inte ansetts vara stränggjutningsbara, numera kan gjutas med gott resultat.

Projekt har också inriktats på reoxidationsfri gjutning, d.v.s. gjutning där stålet skyddas från luft och andra syrekällor som kan oxidera stålet. Förfarandet ger en kvalitetsförbättring som i sin tur ger ökad livslängd hos produkterna.

## Möjligheter

I Sverige götjuts cirka 10 % av det totala tonnaget. Att allt inte strängjuts beror på att vissa stålsorter inte anses vara lämpliga för stränggjutning p.g.a. segringsbenägenhet, sprickkänslighet, dimension m.m. För vissa ståltypen som strängjuts finns fortfarande problem som sprickor och ytfel men som genom efterföljande slipningsoperationer kan rättas till. Utvecklingen den närmaste framtiden kommer att fortsätta fokuseras på förbättring av gjutpulvrens egenskaper, kokillutformning, kokillkyllning och mätteknik för att överföra ytterligare stålsorter till stränggjutning samt för att öka materialutbytet i efterföljande operationer. Exempel på några tänkbara forskningsområden som kommer att kräva insatser är:

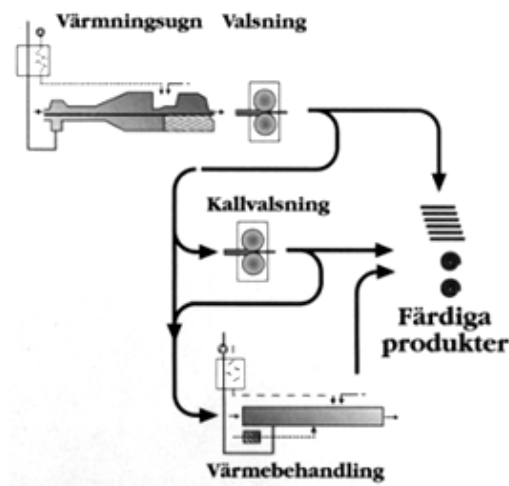
- Utveckling av metallurgiska operationer som medför att gjutning av stålsorter som är legerade med t.ex. cerium blir möjlig, är ett område där samarbete mellan gjutningsexperten och smältmetallurgen är nödvändigt.
- Andra utvecklingsområden som kommer att kräva resurser är instrumentering och modellering av stränggjutningsprocessen samt utveckling av gjutningsprocesser för klenare dimensioner, t.ex. gjutning av band och tunna slabs.
- Ökad produktivitet vid götjutning, t.ex. genom minskad porbildning.

# Bearbetning och ugnsteknik

## Rätt egenskaper och form

Nästan allt stål som tillverkas ska bearbetas ytterligare efter gjutningen innan det blir det man brukar kalla handelsfärdigt stål. Rätt form och rätt egenskaper, som exempelvis ultrahög hållfasthet, hos det handelsfärdiga stålet fås genom att på olika sätt kombinera värmning, kylning och bearbetning av stålet.

Stålets sammansättning ger basen för vilket slutprodukt som kan erhållas. Men det är bearbetningens balansgång längs rätt temperatur- och deformationskurva som bestämmer de slutliga egenskaperna. Att producera ett avancerat stål kräver en väl uppbyggd processkedja och mycket noggrann styrning av dess parametrar, exempelvis ugnstemperaturer och valsningshastigheter, för att slutligen få till precis rätt form och egenskaper med jämn och hög kvalitet. Eftersom värmning, bearbetning och värmebehandling är avgörande för stålutvecklingen har energieffektiviseringen av bearbetningsprocessen alltid gått hand i hand med produkt- och processutvecklingen. Eller rättare sagt varit del av samma teknikutveckling.



Exempel på processvägar för valsade produkter.

## Processen

Processgången kan se mycket olika ut beroende på slutprodukt, men i regel inleds den med att stålet varmbearbetas genom valsning eller smide. Detta förutsätter att stålämnen värms upp till 1000-1300°C så att stålet blir formbart. Efter varmbearbetningen processas vissa stålsorter vidare genom kallbearbetning (exempelvis kallvalsning eller tråddragning) och/eller värmebehandling. Värmebehandling sker vid lägre temperatur (200-1200 °C, ofta omkring 700 °C) och är till för att stålet ska

få önskade egenskaper. Det som bestämmer temperaturen är de processer som ska ske inne i stålet för att uppnå de rätta egenskaperna.

Företagen kan ha hundratals olika stålsorter i sina produktprogram vilka på olika sätt, och med olika värmningstemperaturer, går igenom sinsemellan olika serier av formnings- och värmebehandlingsoperationer. Att arbeta med att energieffektivisera processerna är alltså komplext och handlar om allt från teknikförbättring till logistik.

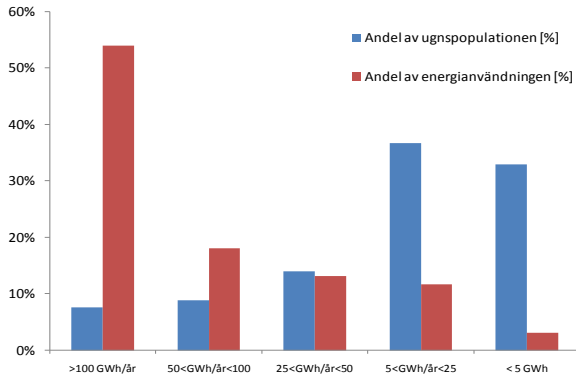
## Ugnarna – de största energianvändarna

I förhållande till råstålstillverkningen är energianvändning i bearbetningslinjerna lägre. Av bearbetningslinjernas operationer är det varmbearbetning som använder mest energi; enligt statistiken totalt nästan 5 TWh/år i svensk stålindustri ett normalår, inräknat syrgas och el. Detta motsvarar drygt 20 % av den totala energianvändningen inom järn- och stålindustrin. Det är i själva värmningen som den stora energianvändningen sker. Normalt brukar vara att valsningen använder ungefär en femtedel så mycket energi som värmningsugnarna, då mestadels el för att driva valsarna.

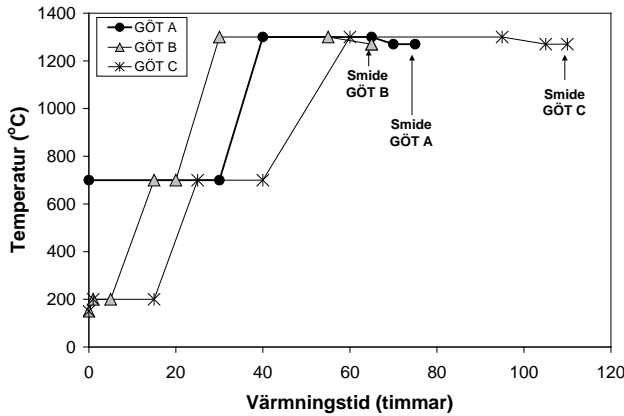
Energianvändningen för värmebehandling utgör en relativt liten del av stålindustrins totala energianvändning, dels för att inte alla stål värmebehandlas, men framför allt för att temperaturerna är betydligt lägre. Utifrån den statistik som samlas in är det rimligt att anta att endast omkring 5 % av stålindustrins bränsleanvändning (på energibas och exklusive koks och kol) används för värmebehandling medan motsvarande siffra för el är 9 %.

## Mer än hälften av energin används i en handfull stora värmningsugnar

Det finns ett hundratal bränsleledade ugnar i svensk stålindustri och storleken varierar. Ugnarna har mycket olika utformning, kan arbeta kontinuerligt och satsvis. Mer än hälften av bränslet används i ett fåtal mycket stora ugnar (>100 GWh/år) som värmer hundratals ton stål per år. Det stora flertalet ugnar är dock relativt små (< 25 GWh/år) och bränsleförbrukningen i dessa många ugnar uppgår sammanlagt till endast omkring 15 % av den totala bränsleförbrukningen i bearbetningssteget. Slutsatsen blir alltså att den största energimängden används i ett fåtal stora ugnar samtidigt som ett stort antal ugnar har en relativt begränsad energisparpotential.



Energianvändningen i ugnarna i svensk stålindustri år 2002.



Exempel på värmningsprogram för tre olika stålsorter.

## Olika produkter kräver olika energiinsats

Energianvändningen i processavsnitten nedströms gjutningen är produktberoende i än högre grad än processavsnitten uppströms densamma. Sluttemperaturen och ämnets dimension spelar stor roll för hur stor energianvändningen är. Dessutom måste vissa stål värmas och kylas flera gånger för att uppnå de rätta egenskaperna. Andra måste hållas vid en hög temperatur en längre tid för att strukturomvandlingar i stålets inre ska hinna ske. Att jämföra specifika energital för olika stål och stålprodukter och därur dra slutsatser om processernas effektivitet är därför inte rättvisande. Energitalen måste på något sätt sättas i relation till förädlingsvärdet.

Teoretiskt krävs det cirka 20 kWh för att värma ett ton stål 100°C, vilket motsvarar entalpihöjningen i stålet. omkring 260 kWh per ton för att värma ett stål till en relativ vanlig värmingstemperatur på 1300°C. En så låg energianvändning är dock inte möjlig i en verklig ugn, där förluster av olika slag är oundvikliga. De stora värmvärmningsugnarna i Borlänge, som är mycket effektiva i ett internationellt perspektiv, använder i genomsnitt mellan 300 och 400 kWh per ton. I en energikartläggning som genomfördes för långa produkter inom svensk stålindustri varierade de specifika värmingstalen från cirka 300 kWh/ton (för varmchargerat material) till närmare 1000 kWh/ton. För värming av stora göt från rumstemperatur till värmingstemperatur kan det handla om ett par tusen kilowattimmar per ton.



Stålämne på väg från värmningsugn till valsning.

## Teknikutvecklingen på ugnssidan

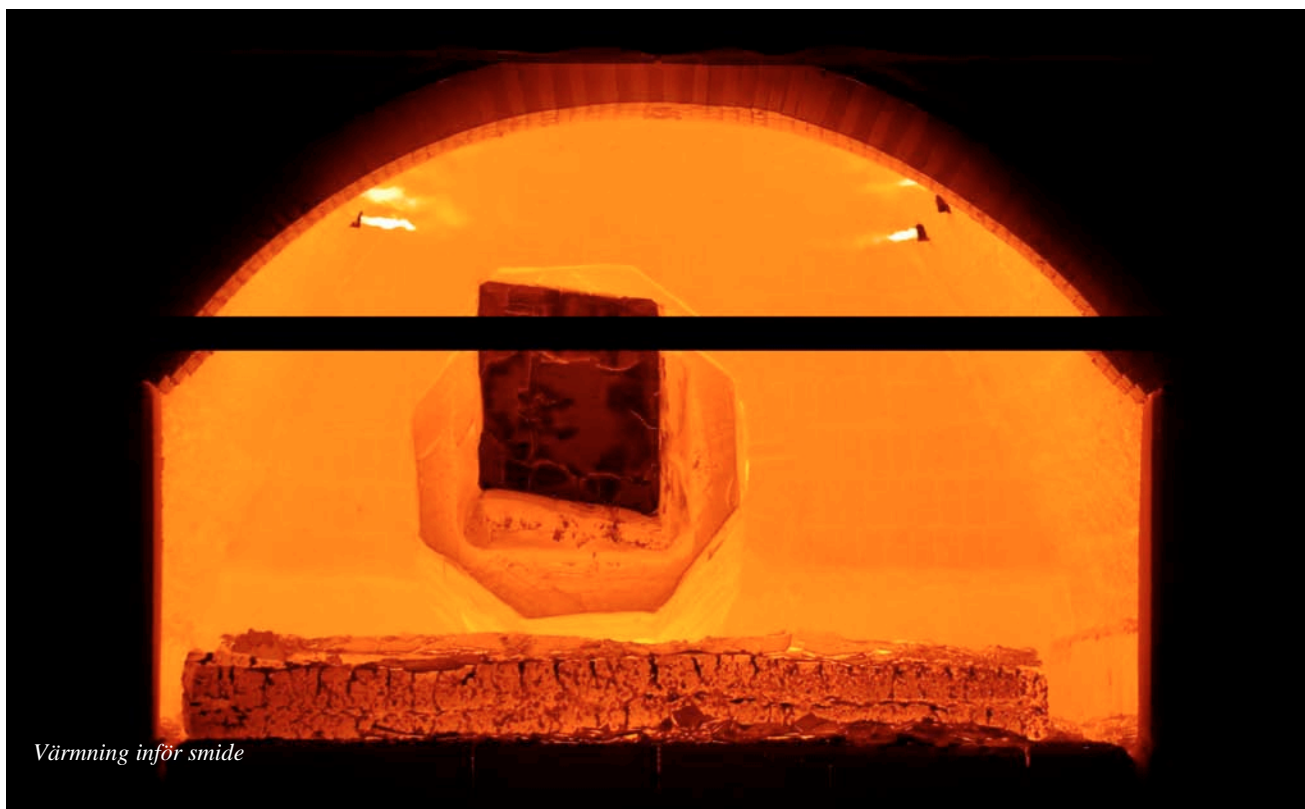
Valsningstekniken fick sitt stora genomslag på 1800-talet och med den kom de första ugnstekniska innovationerna, exempelvis den så kallade gasvällugnen. Gasvällugnarna möjliggjorde kontinuerlig värmning i motström, vilket innebar en avsevärd effektivisering i förhållande till den värmning man hittills varit hänvisad till (exempelvis härdar). Redan tidigt började man alltså ta tillvara rökgasens värmeinnehåll för att förvärma stålet.

När man på 1880-talet förstod strålningens betydelse för värmningen gjorde det att man insåg att man genom att höja valven i ugnarna ytterligare kunde förbättra effektiviteten i värmningen. Därefter gick teknikutvecklingen allt snabbare. På 1930-talet gjordes teorin kring värmeöverföring (ledning, konvektion och strålning) praktiskt användbar för konstruktionsberäkningar samtidigt som olika typer av pyrometrar för temperaturmätning blev tillgängliga vilket förbättrade förutsättningarna för operatörernas styrning av ugnen. När datorerna sedan under 1960-talet gjorde sitt intåg, utnyttjades de först inom ugn- och brännarkonstruktion för att sedan, under 1970-talet, börja användas för on-line styrning av temperaturen i ugnarna.

De senaste decennierna har stålproduktionen utvecklats kraftigt och så även ugnarna, som är bearbetningens största energianvändare. Avancerad teori och modeller ligger idag till grund för så väl stålutveckling, dimensionering och optimering av processer och processutrustning. Rent ugnstekniskt är det framförallt styrsystemen och brännarna som utvecklats. Svensk stålindustri har på styrområdet varit mycket aktiv, inte minst genom den branschgemensamma utvecklingen av värmningsmodellen STEELTEMP® och styrsystemet FOCS.

Värmningen i ugnarna regleras genom att ugnstemperaturen mäts och justeras. Att man inte styr direkt på stålets temperatur beror på svårigheter att mäta denna. I moderna styrsystem används så kallade överordnade styrsystem som hela tiden beräknar måltemperaturen utifrån mätningar av ugnstemperaturen och beräkningar av stålets temperatur med hjälp av modeller. Beräkningen ligger sedan till grund för den regleråtgärd som det underordnade styrsystemet gör. Ju mer avancerade och ju bättre intrimmade ugnens styrsystem är, desto bättre är förutsättningarna att köra ungen på ett energieffektivt sätt. Typiskt kan användningen av ett överordnat styrsystem medföra en energieffektivisering på 10-15 %, främst tack vare att övervärmning undviks. Styrsystemen och modellerna förbättras hela tiden genom nya funktioner och bättre modeller. En tendens är också att off-line modeller går mot användning on-line allteftersom datorernas beräkningskapacitet ökar.

Under 1990-talet skedde en kraftig utveckling inom förbränningsteknik i syfte att öka energieffektiviteten i värmningen. De tekniker som togs fram byggde på att ytterligare minska värmeförlusterna via rökgaserna genom att förvärma förbränningsluften i regenerators eller på att använda syrgas istället för luft (oxyfuel). Med dessa tekniker kan bränsleförbrukningen i ugnen minskas med cirka 35-50 % i förhållande till en traditionell kal-luftsbrännare. Både regenerativ teknik och oxyfuel är idag fullt kommersiella tekniker, om än ej för alla tillämpningar. Oxyfuel finns i över 120 installationer i stålindustrin världen över. Regenerativ teknik har också tillämpats i många värmningsugnar i världen. I svensk stålindustri har dock oxyfuel haft ett större genomslag än regenerativ teknik.



Värmning inför smide

## Effektiviseringsmöjligheter

De största energianvändarna bland ugnarna i de svenska verken ligger vid eller förhållandevis nära industriell state-of-the-art vad det gäller brännar- och reglersystemen och har sedan länge överordnade styrsystem. Detta gör att potentialen för att effektivisera med hjälp av trimning och utveckling av dessa system är, procentuellt sett, relativt modest i förhållande till det fall man då går från ett tillstånd av mer eller mindre manuell reglering. Därmed är dock inte sagt att potentialen är oansenlig, framför allt inte om man räknar in de utbyteshöjningar som kan åstadkommas med hjälp av en bättre processkontroll. En minskning av övervärmningen med 5°C i de större ugnarna effektiviserar energianvändningen med någonstans kring 60 GWh/år. Räknar man därutöver på ökat utbyte tack vare den förbättrade styrningen, effektiviseras energianvändningen ytterligare.

En flaskhals i styrsystemen är kvaliteten på temperaturmätningarna. Om det exempelvis skulle gå att styra direkt på ämnestemperaturen skulle detta kunna öka precisionen i tillverkningen vilket skulle kunna minska övervärmning och öka utbytet. Men detta kräver utveckling av ny mätteknik som klarar den tuffa miljön i ugnen.

Ett viktigt arbete ur energieffektiviseringssynpunkt är att höja tekniknivån för de ofta mindre ugnar som ligger långt ifrån den lägsta möjliga energianvändningen. I detta fall är det knappast forskning som behövs, utan snarare kan ett organiserat erfarenhetsutbyte företagen emellan spela en roll, liksom incitament för att genomföra exempelvis brännarbeten.

## Varmflöde

Att tillvarata så mycket som möjligt av värmeenergin från gjutningen genom att låta en så stor del av stålet som möjligt gå i varmt flöde från gjutningen till bearbetningen är något de flesta verk sedan länge arbetar med. Begränsningarna för varmflöde är i hög grad verks- och produktspecifika. Med tanke på att stålverken ofta har fler än ett hundra olika stålsorter på sitt program, var och en med varierande dimensionsområden, temperaturkurvor och tid i ugn är det ofta allt annat än logistiskt elementärt att införa varmflöde. Generellt kan man säga att detta pussel blir svårare ju mer avancerade och diversifierade verkets produkter är och ju kortare serier som tillämpas, vilket för övrigt är typiskt för flera av de svenska verken som nischat sig mot smala kundsegment. Idag tillämpar flera svenska verk varmflöde på en del av sin produktion men potential finns att öka denna andel.

Det första verket i Europa som byggt helt kontinuerlig linje från stränggjutning till färdig plåt ligger i Cremona. Att införa liknande teknik i svenska verk förutsätter detta stora investeringar i helt nya linjer.

## Tillbaka till träbränslen?

De första gasvällugnarna på 1800-talet använde förgasad biomassa som bränsle. Sedan länge är gasol det vanligaste bränslet i bearbetningslinjernas ugnar, därefter olja. I

och med handeln med utsläppsrätter och stigande priser på fossila bränslen har dock biobränslen återigen blivit potentiellt intressant för användning i värmningsugnarna, i ett första steg kanske genom inblandning i mer högvärdiga bränslen. För att nya typer av bränslen ska kunna användas i ugnarna krävs dock en hel del forskning och utveckling.



*Biobränsle.*

## Möjligheter

Energieffektiviseringsforskningen inom bearbetnings- och ugnsteknik kommer sannolikt att – förutom effektivisering av värmningsugnarna – framför allt handla om att öka kvalitet och utbyte längs hela linjerna och att fasa ut de fossila bränslena och att förbättra utnyttjandet av ugnsparken. Exempel på tänkbara forskningsområden är:

- Demonstration av modern brännarteknik i specifika tillämpningar, exempelvis mattor av takbrännare.
- Förbättrade körplaner vid värmning av olika poster med olika dragtemperaturer. Optimering av användning av ugnsparken.
- Direktmätning av ämnestemperatur och ugnsatmosfär i värmningsugnar för bättre randvillkor till styrsystemen.
- Användning av lågvärdiga bränslen (som masugns gas och syntesgas). Tekniken måste anpassas och materialkvaliteten säkras i den nya ugnsatmosfären.
- Länka kvalitetsbrister/haverier till processparametrar – Fortsatt utveckling av multivariata metoder för ökat utbyte och kvalitet.
- Optimering av bearbetningsoperationerna för ökat utbyte och kvalitet.

# Slutsatser

## Allt mer avancerade stål

För att kunna hävda sig i den internationella konkurrensen kommer det att vara nödvändigt för den svenska stålindustrin att fortsätta med nisch-strategier, där man siktar in sig på avancerade produkter med högt förädlingsvärde och ett nära samarbete med kunder i specifika marknadssegment. Andelen avancerade stål – år 2010 står de för två tredjedelar av produktionen – kommer därför att öka ytterligare, samtidigt som det kommer att bli nödvändigt att korta tiden för utveckling av nya stålsorter.

## Dyrare energi och råvaror

I och med att energi och råvaror blir dyrare kommer råvaror av sämre och varierande kvalitet att bli vanligare och nya bränslen, med lägre koldioxidutsläpp, kommer sannolikt att bli konkurrenskraftiga och därmed introduceras. Processerna måste anpassas till detta. Om man beaktar att produktionen samtidigt går i en riktning där kvalitetskraven (t.ex. avseende renhet) höjs till följd av att andelen avancerade stålsorter ökar, är det en utmaning att behålla och öka materialutbyte och energieffektivitet i processerna.

## Processförändringar och skräddarsydda stål

Ökad effektivitet och utbyte i befintlig energiproduktion samt minskade utsläpp till miljön kan ofta inte åstadkommas på ett signifikant sätt utan större processförändringar. Dessa innebär ofta ökade materialkrav på grund av t.ex. högre temperatur och mer korrosiva miljöer. För förbränningsugnar, rekuperatorer, turbinblad mm krävs stål med nya och bättre, ofta även skräddarsydda egenskaper.

## Nytt stål möjliggör ny energiteknik

För energiproduktion från förnybara energikällor kan nya stål ofta ses som möjliggörare för den teknik som krävs. Svensk stålindustri levererar också nya material och produkter för att bidra till realisering av effektiv energiproduktion från t.ex. sol och vind. För dessa nya material ställs ofta höga krav på egenskaperna vilket i sin tur innebär snäva krav på t.ex. kemisk sammansättning och mikrostruktur.

## Forskning i samarbete med industrin

Många förbättringar kommer att ske i befintliga processer för stålframställning men i framtiden utvecklas också nya processkoncept, som endast kan förverkligas genom stora satsningar på tillämpad forskning i samarbete med industrin.

Även om de verkligt stora ”klippen” i effektiviseringshänseende ofta görs i ”tekniksprång” är potentialen att effektivisera energianvändningen genom relativt enkla – och ofta billiga – åtgärder betydande. De energiforskningsprogram som framgångsrikt drivits inom stålindustrin kännetecknas av vissa allmänna kriterier.

- Hög energirelevans. Hela kedjan råvaror– stålproduktion– stålanvändning
- Hög industrirelevans som kopplar till viktiga utvecklingsbehov
- Stor medverkan från industrin.
- Vidareutveckling inom områden där kompetensen i landet är stor.
- Fortsatta insatser inom projekt från tidigare FoU-program.





## DEN SVENSKA STÅLINDUSTRINS BRANSCHORGANISATION

Jernkontoret grundades 1747 och ägs sedan dess av de svenska stålföretagen. Jernkontoret företräder stålindustrin i frågor som berör handelspolitik, forskning och utbildning, standardisering, energi och miljö samt skatter och avgifter. Jernkontoret leder den gemensamma nordiska stålforskningen. Dessutom utarbetar Jernkontoret branschstatistik och bedriver bergshistorisk forskning.

# JERNKONTORET

Box 1721, 111 87 Stockholm • Kungsträdgårdsgatan 10  
Telefon 08-679 17 00 • Fax 08-611 20 89  
E-post [office@jernkontoret.se](mailto:office@jernkontoret.se) • [www.jernkontoret.se](http://www.jernkontoret.se)

