

# Riktad teknologisk förändring: Det handlar om kunskap

## ROB HART

är docent i national-ekonomi vid SLU i Uppsala. Han forskar på kopplingen mellan ekonomisk politik och ekonomins långsiktiga utveckling, framför allt vad gäller tillväxt i produktion samt resurskonsumtion och miljökvalitet. Han är medlem i redaktionsgruppen för *Journal of Environmental Economics and Management*.  
rob.hart@slu.se

*Varför blir ekonomier låsta i ofördelaktiga jämvikter med smutsiga energikällor eller okvalificerad arbetskraft? När flera produktionsfaktorer används behövs modeller med riktad teknologisk förändring (RTF), men dessa används alltför sällan. Vi bygger en enkel RTF-modell och visar att relativ investering i faktor-kompletterande teknologi är lika med de relativa faktorandelarna; detta leder till stabilitet i system med faktorer som är komplement och instabilitet när faktorerna är substitut. Sedan visar vi vikten av hur olika typer av kunskap är länkade till varandra och lanserar en modell som kan förklara låsningar i 'dåliga' jämvikter.*

Solow (1956) visade att långsiktig tillväxt drivs av teknologisk förändring. Romer (1990) visade hur denna förändring kan modelleras som ett resultat av medvetna satsningar på innovation, där drivkraften är marknadsmakten som följer en lyckad upptäckt. Men deras modeller, och nästan alla andra modeller inom tillväxtteori, utgår ifrån att teknologi förbättras i en enda dimension. Det vill säga att arbetskraften, tack vare fler eller bättre 'ritningar' (*blueprints*), kan tillverka allt större mängder av samma slutprodukt. I den verkliga ekonomin används många olika insatsfaktorer – t ex kvalificerad och okvalificerad arbetskraft, eller arbetskraft och naturresurser – och ekonomisk utveckling innebär ofta att de relativa priserna eller kvantiteterna av insatsfaktorerna förändras med tiden. För att analysera sådan utveckling krävs en modell med riktad teknologisk förändring (hädanefter benämnd RTF). I sådana modeller har varje faktor en tillhörande nivå av faktorkompletterande teknologi. Om vi har insatser  $A$  och  $B$  i kvantiteter  $q_a$  och  $q_b$ , kan vi skriva produktionsfunktionen

$$y = f(k_a q_a, k_b q_b),$$

där  $k_a$  och  $k_b$  är nivåerna på de respektive faktorkompletterande teknologierna. En hög nivå på  $k_a$  innebär att  $q_a$  används effektivt.

Det är uppenbart att RTF måste vara central i analysen av visa frågor, t ex analysen av varför priserna på naturresurser har varit relativt konstanta de senaste 100 åren, medan konsumtionstakten har stigit snabbt (se t ex Hart 2009). Men RTF kan vara avgörande även för de största frågorna inom tillväxtteori, t ex varför vissa fattiga länder snabbt närmar sig de rika, medan andra stagnerar. Förklaringen kan vara att det krävs en övergång mellan olika produktionssystem (från okvalificerad arbetskraft/lågteknologi till kvalificerad arbetskraft/högteknologi), en övergång vars modellering kräver att RTF inkluderas. Varför då försummelsen av modeller med RTF? Acemoglu

(2007) menar att vi inte har någon bra förståelse för bestämningsfaktorerna för RTF, en förståelse som måste ligga till grund för vidare analyser. För att avhjälpa detta problem bygger vi en modell för forskning och produktion designad enbart som ett verktyg för att utreda RTF.

I modellen finns det decentraliserade företag som bedriver forskning och produktion, med två insatsfaktorer och tillhörande nivåer på faktor-kompletterande kunskap. Kunskap läcker över mellan företag och mellan de två typerna. Modellen är inte helt specificerad: Vi specificerar inte vad investeringsvaran är och inte heller löser vi för priserna på produktionsfaktorerna eller produkter, eller för tillväxttakten. I stället fokuserar vi på de *relativa* priserna på insatsfaktorerna, *relativ* tillväxt av kunskapsnivåer och *relativ* utveckling på faktorandelarna. På grund av enkelheten i modellen kan vi finna en fullständig matematisk lösning.

Vi använder modellen för att generalisera och omtolka befintliga resultat och visa nya resultat. Vi diskuterar framtida tillämpningsområden för teorin: långsiktig hållbarhet under naturresursbegränsningar; varför fattiga länder kan förbli fattiga trots möjligheten att ta över de rikas teknologier; och varför vägen till en ekonomi byggd på förnybara energikällor kan vara lång men ändå värd att vandra.

## 1. Relativ investering och relativa faktorandelar

Vårt första resultat är mycket enkelt och är att relativ investering i faktor-kompletterande teknologi är lika med de relativa faktorandelarna. Antag att vi har ett företag som ska producera en produkt under en period med hjälp av två insatsfaktorer,  $A$  och  $B$ , i kvantiteterna  $q_a$  och  $q_b$ , till priserna  $p_a$  och  $p_b$ . Företaget kan inte påverka priserna på insatsfaktorerna. Nivåerna på de faktorkompletterande teknologierna är  $k_a$  och  $k_b$  och produktionsfunktionen är således  $y = f(k_a q_a, k_b q_b)$ . De relativa faktorandelarna benämner vi  $S$ , således är  $S = p_a q_a / (p_b q_b)$ . Resultatet är då att  $R_a / R_b = S$ .

För att förstå resultatet, begrunda följande exempel. Ett företag spenderar 10 miljoner kr per år på arbetskraft  $A$  och 1 miljon kr per år på energi  $B$ . En 1-procentsökning i  $k_a$  tillåter en 1-procentsminskning i  $q_a$  och därmed sparar företaget 100 000 kr per år, medan en 1-procentsökning i  $k_b$  tillåter en 1-procentsminskning i  $q_b$  och företaget sparar 10 000 kr per år. Därmed måste ett rationellt företag lägga tio gånger mer pengar på att öka  $k_a$  än  $k_b$ .<sup>1</sup>

Resultatet kan kännas uppenbart eller trivialt, men observera att det inte noteras i den relevanta litteraturen. I sin klassiska bok argumenterar Hicks (1932) att prisökning, snarare än faktorandelsökning, bör ge sporr till teknikutveckling. I enlighet med Hicks argumentation är det vanligt i den empiriska litteraturen att använda enbart prisförändringar för att

<sup>1</sup> Observera att resultatet hänger på att produktionsfunktionerna för de två teknologityperna är av konstant elasticitet, ett antagande som är både vanligt och – viktigare – rimligt. Dessutom förutsätter vi att företaget har nytta av teknologin under en och samma period; annars gäller resultatet exakt enbart på en balanserad tillväxtbana.

förklara riktningen på teknologisk förändring; se t ex Popp (2002). Acemoglu (2002) bygger fundamentet till den moderna teorin om RTF och han beskriver två effekter (pris och marknadsstorlek) som i själva verket är beståndsdelar av faktorandelseffekten.

## 2. Faktorkvantitet och faktorandel

Nästa fråga är, vad händer med faktorandelarna – och därmed RTF – om kvantiteten på en insatsfaktor ändras relativt den andra? Svaret är att det beror på graden av *substituerbarhet* mellan faktorerna. Antag att den tillgängliga kvantiteten av faktor  $A$  ökar med en procent. På grund av lagen om utbud och efterfrågan sjunker priset, men hur mycket? Om insatsfaktorerna är *substitut* sjunker priset med *mindre* än en procent och faktorandelen ökar; exempel på sådana insatser är kvalificerad och okvalificerad arbetskraft, eller fossil och förnybar energi. Å andra sidan, om insatserna är *komplement*, sjunker priset med *mer* än en procent; exempel är arbetskraft och energi, eller arbetskraft och naturresurser.

Med tanke på resultatet ovan,  $R_a/R_b = S$ , är det klart att substituerbarheten spelar en nyckelroll vad gäller RTF. Om insatserna är substitut och  $q_a$  ökar, ökar faktorandelen och därmed  $R_a$  och på sikt  $k_a$ . Detta ger positiv återkoppling: faktorandelen,  $R_a$  och  $k_a$  ökar ytterligare. Allt annat lika kommer faktor  $A$  att ta över helt på lång sikt. Å andra sidan, om insatserna är komplement och  $q_a$  ökar, minskar faktorandelen och därmed minskar  $R_a$  och  $k_a$ . Allt annat lika stannar processen av när faktorandelen har gått tillbaka till sin ursprungliga nivå (i enlighet med det kända resultatet av Kennedy (1964)).

Allt annat lika ovan innebär att kunskapsstockarna  $k_a$  och  $k_b$  växer oberoende av varandra, dvs att en hög nivå av kunskap  $k_a$  inte underlättar ackumulering av  $k_b$ . Om oberoende kunskapsstocker gällde generellt skulle det ha långtgående konsekvenser. Till exempel skulle det innebära att naturresursknapphet aldrig kan bli ett långsiktigt problem eftersom ekonomin på sikt kan anpassa sig till godtyckligt låga naturresursflöden. Dessutom, om vi har två insatser som är substitut vars faktorkompletterande teknologi utvecklas oberoende av varandra kommer vi att få en hörnlösning och vilket hörn beror på historiken och inte faktorernas beskaffenhet. Därmed argumenterar Acemoglu m fl (2011) att vi är på väg mot ett fossilt hörn vad gäller energi, men att en tillräckligt kraftig punktinsats skulle kunna flytta ekonomin till andra sidan tröskeln så att den går mot ett hörn med enbart förnyelsebara energikällor.

## 3. Länkar mellan kunskapsstockar

Analysen ovan förklarar den stora bilden – faktorandelar för substitut tenderar att vara känsliga på lång sikt, medan faktorandelar för komplement tenderar att vara stabila – men det finns problem. För det första vet vi att

kunskap i ett område gynnar kunskapsutveckling i andra områden. Antag t ex att datorer utvecklas för att komplettera arbetskraft; då kan datortekniken senare tillämpas för att komplettera energi (t ex för att hitta sätt att göra energianvändning mer effektiv). För det andra ser vi inte enbart hörnlösningar (substitut) och konstanta faktorandelar (komplement). Kan modeller med länkar mellan  $k_a$  och  $k_b$  förklara verkligheten bättre?

För precision skriver vi två ekvationer som generellt beskriver hur kunskapsstockarna reagerar på företagets investering. Vi antar att företagen producerar teknologi för produktion i period  $t+1$  genom att bygga på den generella kunskapsnivån i period  $t$  och att denna nivå är, i symmetrisk jämvikt, lika med teknologin hos det representativa företaget,  $(k_{at}, k_{bt})$ . Därmed kan vi skriva, för det representativa företaget i jämvikt,

$$k_{at+1} = k_{at}g(k_{at}/k_{bt})z_a R_{at+1}^\varphi \text{ och } k_{bt+1} = k_{bt}h(k_{at}/k_{bt})z_b R_{bt+1}^\varphi,$$

där  $z_a$ ,  $z_b$ , och  $\varphi$  är positiva parametrar ( $\varphi < 1$ ) och funktionen  $g$  är minskande (eller eventuellt konstant) i sitt argument medan  $h$  är ökande (eller eventuellt konstant) i sitt. Till sist definierar vi notationen  $K_t = k_{at}/k_{bt}$  och funktionen  $F = g/h$ . I fallet med oberoende kunskapsstockar är  $g(K) = 1$  och  $h(K) = 1$  och därmed är  $F(K) = 1$ ; tillväxt i t ex  $k_{at+1}$  bygger enbart på existerande kunskap  $k_{at}$  och inte alls på  $k_{bt}$ . Om kunskapsstockarna är länkade innebär det att när  $k_a$  ökar i förhållande till  $k_b$  underlättas ackumulering av  $k_b$  relativt  $k_a$ , och ökningen i  $k_a/k_b$  bromsas.

Vi börjar med insatsfaktorer som är komplement, t ex arbetskraft ( $A$ ) och naturresurser eller energi ( $B$ ). Antag att  $q_b$  ökar. Den kortsiktiga effekten blir att  $B$ :s faktorandel minskar och den långsiktiga effekten blir att en del av minskningen består. Därmed leder en ökning i resursflöden till en minskning i naturresursernas faktorandel, i enlighet med det som rapporteras av t ex Smulders and de Nooij (2003) och Heidrich (2010). Tvärtom, om naturresurs- eller energiflöden måste minska på sikt (på grund av av klimatförändring eller resursbrist) kommer deras faktorandel att öka, med en negativ effekt på tillväxten i produktion. Storleken på effekten beror på hur starka länkarna mellan kunskapsstockarna är. Detta kan öppna en helt ny ansats till frågan om långsiktig hållbarhet under naturresursbegränsningar, i kontrast med den traditionella ansatsen med konstant teknologi (se t ex Solow 1974, Hartwick 1977 och Asheim m fl 2003) och några nyare artiklar med RTF fast utan länkar mellan kunskapsstockar (Smulders och de Nooij 2003; Hart 2009).

När insatsfaktorerna i stället är substitut – t ex olika typer av arbetskraft, eller olika energislag – visar vi att de detaljerade egenskaperna hos länkarna mellan kunskapsstockarna är avgörande. I det enklaste fallet har vi *konstant elasticitet*, dvs  $F(K) = K^{-\sigma_c}$ , där  $\sigma_c \in (0,1]$ . Detta är det fall som undersöks av Acemoglu (2002), med följande resultat: (i) om länkarna är för svaga i förhållande till graden av substituerbarhet mellan faktorerna får vi fortfarande en hörnlösning; (ii) om länkarna är 'lagom svaga' hindras en hörnlösning, men priset ökar på den insats vars mängd ökar, dvs uppåt lutande

långsiktig efterfrågan; och (iii) om länkarna är starka ökar faktorandelen men inte priset på faktorn.

### 4. Kunskapsläckage

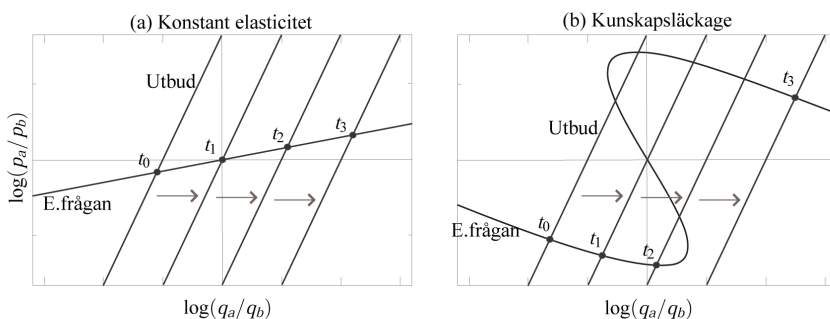
Tyvärr är antagandet om konstant elasticitet för enkelt. Ta t ex en situation där kunskapsnivån  $k_b = 0$ . I så fall är det omöjligt att ackumulera kunskap  $k_a$  eftersom  $g(k_a/k_b) = 0$  när  $k_b = 0$ . *Kunskapsläckage* mellan sektorerna bör i stället innebära att ackumulering av  $k_a$  gynnas av att  $k_b$  är stor, men att  $k_b$ :s existens inte är väsentlig för ackumulering av  $k_a$ . I enlighet med detta, antag att all kunskap finns i patent och därmed representerar  $k_a$  och  $k_b$  kvalitén på patenter vad gäller *A*-kompletterande och *B*-kompletterande teknologi. Då kan man tänka sig att  $k_{at+1} = (k_{at} + \sigma_s k_{bt})z_a R_{at+1}^\varphi$ , där  $\sigma_s$  kan tolkas som den relativa sannolikheten att ett nytt patent i sektor *A* citerar ett patent i sektor *B*. Denna funktion (samt den symmetriska funktionen i sektor *B*) resulterar i

$$F(K_t) = \frac{1}{K_t} \frac{K_t + \sigma_s}{1 + \sigma_s K_t}$$

För att illustrera skillnaden mellan konstant elasticitet och kunskapsläckage visar vi i figur 1 effekterna av förflyttningar i det relativa utbudet av *A* och *B*, där utbudskurvan lutar uppåt. Ekonomin börjar i ett läge där *B* dominerar, sedan låter vi det relativa utbudet av *A* stiga. Med konstant elasticitet (figur 1a) har vi uppåtlutande efterfrågan på sikt, det finns alltid en unik stabil jämvikt och när utbudet av *A* ökar, ökar också priset och faktorandelen stadigt. Med kunskapsläckage (figur 1b) har vi vanlig nedåtlutande efterfrågan initialt, men så småningom nås en tröskel där ekonomin byter till en ny jämvikt där *A* dominerar.

För att förstå mekanismen diskuterar vi fallet med förnybar/fossil energi i mer detalj. När förnybar energiproduktion utökas sjunker priset på förnybar energi relativt priset på fossil energi, i enlighet med lagen om utbud och efterfrågan. (Observera att de förnybara energikällorna inte är perfekta substitut för fossilenergi, på grund av faktorer som den varierande och osäk-

*Figur 1*  
En jämförelse av effekterna av förflyttningar i relativt utbud när insatsfaktorer är substitut



Källa: Egna beräkningar.

ra produktionen, samt att motorfordon är anpassade för fossila bränslen.) Men om utbudet av förnybar energi ökar tillräckligt mycket relativt fossila bränslen, då sker en teknologisk omvandling i ekonomin där mycket teknologi som kompletterar förnybar energi utvecklas och denna energityp tar över; priset på fossila bränslen sjunker eftersom de inte längre efterfrågas.

Vad gäller kvalificerad arbetskraft är logiken liknande. Ett land med mycket okvalificerad arbetskraft utvecklar teknologier som passar denna arbetskraft och om mängden kvalificerad arbetskraft ökar kan den relativa lönen för denna sjunka. Landet verkar vara fast i en fälla. Men om mängden kvalificerad arbetskraft kan höjas tillräckligt, eller om tillräckligt med teknologier som kompletterar kvalificerad arbetskraft kan etableras, kan landet hitta en väg ur fällan och sätta igång en snabb omvandling. Denna mekanism skiljer sig markant från befintliga modeller i litteraturen, t ex i Acemoglu and Zilibotti (2001), som bygger på att 'the South' måste använda dåligt anpassade teknologier som utvecklas i de rika länderna och därmed undviks också problematiska slutsatser som att en kvalificerad arbetare där bör tjäna bättre än samma arbetare i den rika delen av världen.

## REFERENSER

- Acemoglu, D (2002), "Directed Technical Change", *Review of Economic Studies*, vol 69, s 781-809.
- Acemoglu, D (2007), "Equilibrium Bias of Technology", *Econometrica*, vol 175, s 1371-1410.
- Acemoglu, D, P Aghion, L Bursztyn och D Hemous (2011), "The Environment and Directed Technical Change", under utgivning i *American Economic Review*.
- Acemoglu, D och F Zilibotti (2001), "Productivity Differences", *Quarterly Journal of Economics*, vol 116, s 563-606.
- Asheim, G B, W Buchholz och C Withagen (2003), "The Hartwick Rule: Myths and Facts", *Environmental and Resource Economics*, vol 25, s 129-150.
- Hart, R (2009), "The Natural-resource Sawsaw: Resource Extraction and Consumption with Directed Technological Change", presenterat vid EAERE 2009, manuskript, Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala.
- Hartwick, J M (1977), "Intergenerational Equity and the Investing of Rents from Exhaustible Resources", *American Economic Review*, vol 67, s 972-974.
- Heidrich S (2010), "Directed Technological Change from an Empirical Perspective", magisteruppsats, institutionen för ekonomi, Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala.
- Hicks, J (1932), *The Theory of Wages*, Macmillan, London.
- Kennedy, C (1964), "Induced Bias in Innovation and the Theory of Distribution", *Economic Journal*, vol 74, s 541-547.
- Popp, D (2002), "Induced Innovation and Energy Prices", *American Economic Review*, vol 92, s 160-180.
- Romer, P M (1990), "Endogenous Technological Change", *Journal of Political Economy*, vol 98, s 71-102.
- Smulders, S och M de Nooij (2003), "The Impact of Energy Conservation on Technology and Economic Growth", *Resource and Energy Economics*, vol 25, s 59-79.
- Solow R M (1956), "A Contribution to the Theory of Economic Growth", *Quarterly Journal of Economics*, vol 70, s 65-94.
- Solow, R M (1974), "The Economics of Resources or the Resources of Economics", *American Economic Review*, vol 64, s 1-14.