

de opmaat van de industriële revolutie

*de metallurgen
de constructeurs
de bakermat van de moderne ijzerindustrie
over hete lucht en fris ijzer
wroeten in de gloeihitte
rollen gaat beter dan slaan*

Eeuwenlang berust de kunde van het winnen en verwerken van metalen louter op ervaring. De in de praktijk opgedane kennis gaat over van vader op zoon of wordt op zijn minst binnen de familie gehouden. De in de antieke wereld opgebouwde en op schrift vastgelegde kennis en ervaring worden in de vroege middeleeuwen voor de vergetelheid behoed door kloosterorders. De Cisterciënzers bewaren niet alleen de ambachtelijke kundigheden, maar brengen ze ook in de praktijk. Gedurende de middeleeuwen en de vroegmoderne tijd worden kennis en vaardigheden bewaakt en beheerd door de ambachtsgilden. Het aantal leerlingen per meester is in de regel gelimiteerd en ook binnen het gildeverband is de kennisoverdracht van meester op leerling vaak een familieaangelegenheid. In de zestiende eeuw ontwikkelt zich een wetenschappelijke basis voor de mijnbouw, het winnen van metalen uit erts en het bewerken van metalen tot halffabricaten en eindproducten. De metallurgie - in het Grieks 'metallourgos', wat metaalbewerker betekent - ofwel metaalkunde, ontstaat en vindt zijn 'geestelijke vaders' in de Italiaan Vannaccio Biringuccio en de Duitser Georg Agricola. Mijnbouw en de winning van metalen uit erts worden door hen bestudeerd en systematisch geboekstaafd. Het maken van werktuigen en apparaten uit metaal is eeuwenlang het handwerk van de smid die mede door specialisatie een hoge mate van vakbekwaamheid weet te bereiken. In de late middeleeuwen en in de vroegmoderne tijd zijn er veel innovaties in de werktuig en apparatenbouw. Het zijn deze metallurgische en werktuigbouwkundige ontwikkelingen die de opmaat vormen voor de Industriële Revolutie.

de metallurgen

In het midden van de zestiende eeuw verschijnen er een tweetal boekuitgaven, *De la pirotechnia* en *De re metallica libri XII*, die zowel qua opzet als naar inhoud revolutionair zijn te noemen en de mineralogie, zowel als de metallurgie een wetenschappelijke basis geven. De eerste is van de hand van Biringuccio, de tweede is geschreven door Agricola. Beide boeken behandelen de winning en verwerking van erts en het gieten en bewerken van metalen. Bij Agricola ligt de nadruk meer op het eerste en bij Biringuccio meer op het laatste. Met deze uitgaven wordt de kennis over winning en verwerking van metalen breder toegankelijk gemaakt. Biringuccio is een man van de praktijk, een metaalbewerker en zijn boek handelt over smelten, zuiveren en het analyseren van erts. Hij beschrijft ook het gieten van metalen, het vormen van gietkasten, het maken van kernen en de productie van gietstukken als kanonnen en gietijzeren kanonskogels. Zijn boek is de eerste methodische beschrijving van het gieterijbedrijf. Agricola is een wetenschapper, die bekend is geworden als de 'vader van de mineralogie'. Zijn boek gaat over opsporing en onderzoek van erts en het smelten en zuiveren ervan. Hij beschrijft ook de processen die worden gebruikt om erts te breken en te verrijken. In detail beschrijft hij de analysemethode om vast te stellen welke ertsen waard zijn gedolven te worden. Enkele van de metallurgische praktijken die hij beschrijft zijn in essentie nog steeds in gebruik. Als grondlegger van

de wetenschappelijke mineralogie breekt Agricola met de klassieke leer van Dioscorides¹ en Plinius². Zijn beroemdste werk *De re metallica libri XII* is gepubliceerd in 1556. Het werk, een systematische verhandeling over mijnbouw en metallurgie is met veel instructieve houtsneden geïllustreerd. Het werk bevat in een bijlage de Duitse equivalenten voor de technische termen die in de Latijnse tekst voorkomen.

Een van de vele prachtige houtsneden in De re metallica Libri XII van de hand van Georg Agricola. Illustratie van een smeltoven met A. De smeltoven en B. De voorhaard. De voorstelling toont een 'Stückofen' zo genoemd aangezien deze oven grotere wolven (stukken) kon produceren dan de renhaarden van de woudsmiden.

De re metallica is gedurende enige eeuwen het standaardwerk, dat in meer dan veertig talen is vertaald. De dichter en natuuronderzoeker Goethe (1749-1832) waardeert het werk van Agricola zeer en nodigt uit om zijn leven en werk te leren kennen:

'So bewundern wir ihn noch jetzt in seinen Werken, welche den ganzen Kreis des alten und neuen Bergbaus, alter und neuer Erz- und Steinkunde umfassen und uns als ein köstliches Geschenk vorliegen. Er ... lebte in der höchsten und schönsten Zeit der neu hervorbrechenden, aber auch sogleich ihren höchsten Gipfel erreichenden Kunst und Literatur ...'

Georg Pauer, wiens familienaam boer betekent, is op 24 maart 1494 geboren te Glauchau de hoofdstad van de toenmalige heerlijkheid Schönfeld en thans deel uitmakend van de Duitse deelstaat Saksen. De stad telt in die tijd rond de 1500 inwoners. Het voornaamste middel van bestaan is het weven van laken. Over Pauer's familie en jeugd jaren is weinig bekend. Zijn vader, Gregor Pauer, is vermoedelijk een lakenwever en textielverver. Hij lijkt niet onbemiddeld te zijn geweest aangezien hij drie van zijn vier zoons kan laten studeren en zijn drie dochters met zonen uit aanzienlijke families trouwen. Pauer bezoekt de parochieschool van Glauchau waar hem het lezen, schrijven en rekenen wordt bijgebracht. Op zijn tiende of elfde jaar gaat hij naar het gymnasium in Chemnitz. Het is niet precies bekend hoelang hij lessen aan het gymnasium volgt, maar in 1511 verblijft hij in Maagdenburg. De reden van zijn verblijf in die stad is niet bekend. In 1514 wordt hij als student ingeschreven aan de,



¹ Pedanius Dioscorides (Anazarbu, Cilicië, 1ste eeuw n.C.), Grieks arts en plantkundige, schrijft in ca. 50 n.C. *De materia medica*. Dioscorides beschrijft de planten niet alleen vanuit medicinaal standpunt, maar ook morfologisch. Het boek vormt het voorbeeld voor vele latere kruidenboeken en beheerste eeuwenlang de gehele botanie.

² Gaius Plinius Secundus, ook: Plinius Maior (= de Oudere) (Como 23/24 – bij Stabiae 79 n.C.), Romeins militair, magistraat en schrijver. Van zijn omvangrijk oeuvre, dat zowel historische werk als geschriften op het gebied van retorica en grammatica omvat is slechts het encyclopedische werk uit 77 n.C. *Naturalis historia* bewaard gebleven. Het werk, dat bestaat uit 37 boeken, omvat de wiskundig-natuurkundige beschrijving van het heelal, geografie, etnografie, antropologie, dierkunde, plantkunde, geneesmiddelen uit het planten- en dierenrijk en beschrijft in de boeken 33 tot 37 de mineralogie. In de middeleeuwse wetenschap zijn de sporen van Plinius' werk overal aanwezig. Plinius komt om bij de uitbarsting van de Vesuvius als hij, gedreven door wetenschappelijke interesse, zich van Misenum naar Stabiae begeeft.

in 1409 gestichte, universiteit van Leipzig. Pauer is een 'late leerling', al twintig jaar oud. Een van zijn leraren, Petrus Mosellanus, een van de meest vooraanstaande renaissancegeleerden, professor in de oude talen en een gevierd humanist is slechts een jaar ouder. Mosellanus onderhoudt contacten met Maarten Luther, Desiderius Erasmus, Johannes Reuchlin en Ulrich von Hutten. Hij brengt Pauer in aanraking met het humanisme. Pauer wordt een enthousiast aanhanger van vooral de humanistische ideeën van Erasmus. Hij zal zijn hele verdere leven deze idealen zijn toegedaan. Na pakweg drie jaar studie in de vakken logica, retoriek, mathematica, fysica, astronomie en muziek verwerft Pauer zijn eerste academische graad, het Baccalaureus artium. Vanaf die tijd noemt hij zich Georgius Agricola, de Latijnse versie van zijn naam. Hij verlaat Leipzig en aanvaardt een aanstelling als leraar aan de gerenommeerde stadsschool van Zwickau, een belangrijk regionaal verzorgingscentrum, die in die tijd wel de 'Parel van Saksen' wordt genoemd. Spoedig wordt hem de leiding over de 'Greckische Schul' opgedragen. Het is hier dat hij zijn eerste boek schrijft *Agricolae Glauicii Libellus de prima ac simplici institutione grammatica* een kleine Latijnse grammatica, die in 1520 bij Lotter in Leipzig verschijnt. Deze uitgave is opmerkelijk, omdat het voor het taalonderwijs nieuwe wegen inslaat en taak en verantwoordelijkheid van de leraar helder benoemt. Zijn verblijf te Zwickau stelt hem in de gelegenheid de zilvermijnbouw in het Ertsgebergte te leren kennen en de daarmee samenhangende handel en economie. Agricola keert naar Leipzig terug voor verdere studie en is werkzaam als assistent van Mosellanus. Het vakkenpakket van zijn studie is nu breder en omvat ook medicijnen. Na de dood van Mosellanus verblijft hij van 1523 tot 1526 in Italië en studeert er talen, filosofie, medicijnen en natuurwetenschappen. Er is geen bewijs voor, maar het is niet uitgesloten dat hij onderweg in Bazel Erasmus heeft opgezocht. Het feit dat Erasmus een voorwoord schrijft, iets wat hij maar zeer zelden doet, in het eerste boek van Agricola over mijnbouw doet het vermoeden. Agricola verwerft in Bologna de titel van arts. Na een kort verblijf in Zwickau gaat hij in de herfst van 1527 naar Chemnitz en treedt daar in het huwelijk met Anna Meyner, de weduwe van de Schneeberger belastinginnehmer Mathias Meyner.



Het standbeeld van Georgius Agricola (1494-1555) in zijn geboorteplaats Glauchau in de Duitse deelstaat Saksen.(foto: Dina)

Het in het Boheemse Ertsgebergte gelegen Konradsgrün, dat na de ontdekking van rijke zilverertsaders in 1516 al spoedig St. Joachimsthal wordt genoemd, biedt aan Agricola een nieuwe uitdaging. De vacature van stadsarts en een 'gloeiende ijver voor een studie van de mijnbouw' voeren Agricola uiteindelijk naar Sankt Joachimsthal,³ waarmee de vruchtbaarste periode van zijn wetenschappelijke arbeid aanbreekt. In de 15.000 inwoners tellende vrije bergstad, die over meer dan 900 toegankelijke groeven beschikt, is hij vanaf 1527 de stadsarts en apotheker. Een beroep op maat, zoals zal blijken, want hier kan hij de in Italië verworven kennis in de praktijk brengen en zich bezig houden met mineralogie en metallurgie. Zilvererts wordt reeds vanaf 1168 in Freiberg gewonnen en in Graupen sinds 1241. Vanaf het midden van de dertiende eeuw delft men in Ehrenfriedersdorf, Seiffen en Altenberg ook zinkerts. In 1500 worden rijke zilveraders in de Schreckenbergruine ontdekt. Groeven zijn er onder meer in Breitenbrunn, Marienberg, Schwarzenberg en nabij Schneeberg en Jöhstadt. Uit vele landen trekken mijnwerkers, die de lokroep van het zilver niet kunnen weerstaan, naar het Ertsgebergte om hun geluk te beproeven. Agricola valt als het ware met zijn neus in de boter met een mijnbouw en een aanverwante nijverheid

³ Thans Jachymov in de Republiek Tsjechië

in volle ontwikkeling. Op de vele oprijzende vragen kan hij dankzij zijn opleiding geheel zelfstandig naar antwoorden zoeken. Zijn studie naar de plaatselijke mijnbouw en zijn contacten met mijnwerkers en metaalsmelters zijn zeer intensief. Weldra verschijnt daarover van zijn hand een filosofisch gearde dialoog met als titel *Bermannus, sive de re metallica*. Agricola draagt de dialoog op aan zijn vriend Lorenz Wehrmann, maar het Latijn kent geen letter w, zodat hij de letter b gebruikt. Het boek wordt door Erasmus zeer geprezen en met diens bemiddeling in 1530 uitgegeven bij Froben-Verlag te Basel. De dialoog is tevens een documentatie over de plaatselijke mijnbouw. Het beschrijft de in het mijnbouwgebied voorkomende mineralen en verklaart specifieke mijnbouwbegrippen. Als eerste zet Agricola het ontstaan van het ertsgesteente uiteen en probeert er de aan ten grondslag liggende wetmatigheden te verhelderen en in een systeem onder te brengen. Tegenover de verstarde opvattingen van alchemie en astrologie is zijn aanpak revolutionair. Terzelfder tijd biedt hij zijn programma van onderzoek aan, waarin hij ook de werking van mineralen als geneesmiddel betreft.

Georgius Agricola als burgemeester van Chemnitz. Naar een schilderij van Georg Pindl.



Agricola schrijft in die tijd ook een polemieek over de noodzaak van oorlog tegen de Turken, die Wenen belegeren en het Heilige Roomse Rijk en het Christelijk geloof bedreigen. Hij wijst koning Ferdinand I van Bohemen en alle Duitse vorsten op hun patriottische plichten en roept op om in eensgezindheid de wapenen "mit Leidenschaft gegen einen so ruchlosen Feind" op te nemen. Het in het Latijn geschreven boek verschijnt in 1529, maar is reeds in 1531 door Lorenz Wehrmann in het Duits vertaald en zal daarin zeven drukken bereiken. In 1531 keert Agricola naar Saksen terug en vestigt zich als arts in Chemnitz. De 4500 inwoners tellende stad bezit sinds 1357 een blekerijprivilege. De linnenweverij en lakennijverheid zijn dan ook de belangrijkste bedrijfstakken, maar daarnaast zijn er ook enige houtzaagmolens en koperhamers. Agricola's plichten laten tijd over voor wetenschap en studie. Op de voorgrond staat als eerste de antieke metrologie. Nauwkeurige maten en gewichten zijn voor recepten onontbeerlijk. Zo tracht hij ordening te brengen in de wirwar van maten en gewichten en legt dat vast in het boek *De mensuris et ponderibus Romanorum atque Graecorum* (Maten en gewichten van de Romeinen en de Grieken). Na het overlijden van zijn vrouw in 1542 hertrouwt Agricola met zijn zeventien jaar oude pupil Ana, dochter van Ulrich Schütz eigenaar van een kopermolen te Chemnitz. Uit dit huwelijk stammen drie dochters en twee zoons. In 1546 verschijnt te Basel een vijfdelig verzamelwerk dat Agricola als geleerde tot ver over de grenzen van het land bekendheid geeft. Het hiervan deel uitmakende *De natura fossilium* is het eerste echte handboek over de mineralogie. Het systematiseert de natuurlijke substanties op een volkomen nieuwe manier in aarde, alliages, gesteenten, metalen en mengsels en beschrijft tevens hun medicinale werking. Vanaf 1546 verdwijnt de wetenschappelijke arbeid naar de achtergrond, omdat Agricola in opdracht van de hertog het burgemeestersambt op zich neemt. In deze positie staan een viertal verplichtingen centraal: deelname aan de Landdagvergaderingen, het afsluiten van overeenkomsten, het beheren van oorkonden en zegels en de vertegenwoordiging van de stad als diplomaat. Ondanks de grote belasting door zijn burgemeesterstaken slaagt Agricola erin een nieuw boek met dertien metrologische en monetaire verhandelingen te schrijven. Het zorgt enigermate voor beperking in de massa van maten, munten en gewichten.

Zijn al langer geplande hoofdwerk *De re metallica libri XII* komt in deze jaren tot stand. Hij heeft dit opus magnum, dat het begin van de mijnwetenschappen markeert, reeds in St. Joachimsthal

aangekondigd. Hij heeft vanaf die tijd alle belangrijke bronnen en documenten over mijnbouw en het winnen van metalen, zowel die van antieke geleerden als die van tijdgenoten, bestudeerd. Praktische inzichten uit de technisch hoogontwikkelde mijnbouw in het Eertsgebergte zorgen er voor dat de theoretische studie steeds aan de praktijk wordt getoetst. Agricola overlijdt op 21 november 1555 in Chemnitz na vier dagen aanhoudende koorts. Een plechtige begrafenis als katholiek wordt hem te Chemnitz geweigerd. De familie wendt zich tot bisschop Julius Pflug en deze zorgt er voor dat Agricola in de Domkerk St. Peter und Paul te Zeitz wordt bijgezet. De uitgave van zijn hoofdwerk – *De re metallica libri XII* – vindt in 1556 derhalve postuum plaats.⁴

Vannoccio Biringuccio, geboren te Siena (It.), is gedoopt op 20 oktober 1480. Zijn vader, vermoedelijk een architect, is Paolo Biringuccio en zijn moeder Lucretia di Bartolommeo. In zijn jeugd geniet Biringuccio de bescherming van Pandolfo Petrucci (1450–1511) hoofd van de invloedrijke Petrucci-



familie en dictator van Siena. Petrucci bezorgt Biringuccio werk als metaalkundige en stuurt hem naar Duitsland om de techniek te bestuderen. Na zijn terugkeer in 1513 aanvaardt hij achtereenvolgens aanstellingen als hoofd van een ijzermijn in Siena, Parma en Ferrara. Later is hij verantwoordelijk voor het gieten van kanonnen voor Venetië en Florence. Na het overlijden van Petrucci blijft hij verbonden aan de familie in dienst van Petrucci's zoon Borghese. Een opstand in 1515 dwingt Borghese te vluchten uit Siena en hij neemt Biringuccio met zich mee. In 1523 herroept paus Clement VII de verbanning van de Petrucci's en met hen kan ook Biringuccio terugkeren. In 1524 ontvangt hij een monopolie voor de productie van salpeter voor geheel Siena. De vreugde is echter van korte duur, want in 1526 komt het volk van Siena in opstand en gooit de Petrucci-familie opnieuw de stad uit. De familie doet een vergeefse poging, met medewerking van Biringuccio, om Siena met geweld te heroveren. In 1530 komt Siena in een vrediger periode en Biringuccio keert terug.

Titelblad van eerste editie uit 1540 van De la pirotechnia van de hand van Vannoccio Biringuccio (1480-1538/9).

Het jaar daarop is hij korte tijd stadsbestuurder en betrokken bij verschillende projecten. In 1536 gaat hij naar Rome en werkt voor het Vaticaan, om in 1538, onder paus Paulus III, hoofd van de pauselijke gieterij en directeur van het arsenaal te worden. Het is niet bekend waar en wanneer Biringuccio is overleden. Een document uit 1539 vermeldt dat hij dood is. Het meest bekend is Biringuccio door de uitgave van *De la pirotechnia* in 1540. Hij wordt wel de vader van de giettechniek genoemd, aangezien *De la pirotechnia* het eerste geschreven bewijs is van een goede gieterijpraktijk. De uitgave staat in

⁴ E. Darmstaedter, 'Lebensbeschreibung von Agricola' in: Georg Agricola, *De re metallica. Zwölf Bücher vom Berg- und Hüttenwesen* (Wiesbaden 2003) (facsimile van de uitgave van 1926); H. Prescher, 'Georgius Agricola – ein biographischer Abriss' in: *Museum und Kunstsammlung Schloss Hinterglachau* (Glauchau 1994); F. Naumann, *Georgius Agricola. Berggelehrter, Naturforscher, Humanist* (Erfurt 2007)

een sterk contrast met de alchemistische publicaties uit die dagen. Het boek is kwistig geïllustreerd met houtsneden, die de gereedschappen en werkwijze van die tijd helder in beeld brengen. Het geeft praktische instructies voor mijnbouw, smelten en metaalbewerking. Het is lange tijd een standaardwerk en ook nu nog waardevol als bron voor de stand van de techniek in de vijftiende en zestiende eeuw.

de constructeurs

Leonardo da Vinci (1452-1519), Italiaans schilder, tekenaar, architect, beeldhouwer, musicus, ingenieur, natuuronderzoeker is een uitzonderlijk voorbeeld van de 'homo universale'. Hij is een van de grootste en meest universele geesten die de mensheid heeft gekend. Zijn nieuwe visie op de schilderkunst wekt bewondering en bezorgt hem een enthousiaste groep van leerlingen en navolgers in en buiten Italië. Als onderzoeker heeft Leonardo een vrijwel onbegrensde belangstelling. Hij vergaart kennis op bijna ieder wetenschappelijk gebied en legt deze vast in zijn veelal geïllustreerde notities, in linkshandig spiegelschrift. Hij is autodidact, waardoor hij op natuurwetenschappelijk gebied geen vooroordelen opgedrongen heeft gekregen, maar het ontbreekt hem daardoor ook aan een systematische werkwijze en aan de mathematische kunde, om zijn ideeën verder uit te werken en anderen te overtuigen van de juistheid ervan.

Deze reconstructie van een fiets die door Leonardo ontworpen zou zijn, volgens de makers naar een tekening in de Codex Atlantica, is een grap. De fiets is te zien in het Palm Springs Air Museum.



Tot de vele onderwerpen waarmee hij zich bezighoudt, behoren: op wiskundig gebied de kwadratuur van de cirkel en het construeren van regelmatige veelhoeken, op natuurkundig terrein: de bewegingsleer, de mechanica, de hydraulica, de optica en de akoestiek. Hij is bekend met de camera obscura en weet van de versnelling vanwege de zwaartekracht. Hij vergelijkt de dichtheid van vloeistoffen door vloeistofkolommen in een U-vormige buis met elkaar in evenwicht te brengen, waarmee hij vooruitloopt op de Wet van Pascal. Leonardo ontwerpt de meest uiteenlopende werktuigen, waaronder: watermolens, hefbomen, baggermachines, geschut en ander oorlogstuig, muziekinstrumenten en liften. Bij zijn ontwerp van vliegmachines maakt hij gebruik van zijn observaties van vogels in hun vlucht. Hij ontwerpt kanalen, irrigatiesystemen, modellen voor kanalisatie van de Arno en andere waterbouwkundige werken. Op het gebied van de bouwkunde onderzoekt hij onder meer de krachten die in muren, bogen en zuilen optreden. Hij bestudeert de anatomie van de mens door het verrichten van sectie op lijken, geeft een beschrijving van het hart en de hartkleppen en van de ligging van de menselijke foetus in de baarmoeder, alles voorzien van prachtige anatomische tekeningen. Op geologisch gebied bestudeert hij de vraag of de aarde aan langdurige structuurveranderingen onderhevig is en heeft hij veel aandacht voor fossielen. Zijn onderzoekingen strekken zich verder nog uit over de plant- en dierkunde, vooral het paard en het perspectief. De stand van de techniek van de zestiende eeuw laat voor veel van zijn ontwerpen niet toe dat ze praktisch worden uitgevoerd. Het duurt eeuwen voordat zijn visionaire gedachten tot werkelijkheid worden gebracht. Talrijke losse, ongeordende bladen met de meest uiteenlopende notities en illustraties komen in 1519 in het bezit van zijn erfgenaam en leerling Francesco Melzi. Na Melzi's dood in 1570 raken ze verspreid, totdat de beeldhouwer Pompeo Leoni rond 1600 tien delen met Leonardo's geschriften weet te verzamelen. Hij brengt ze samen in één geweldige foliant, de Codex Atlanticus. Maar ook elders in

Europa bevinden zich losse bladen met aantekeningen en illustraties o.a. in de Royal Library en Windsor Castle.⁵ In 1965 worden twee tot dan toe onbekende notitieboeken ontdekt in de Biblioteca Nacional in Madrid, de Codices Madrid I en II, die vooral technische ontwerpen bevatten.

Kaspar Brunner (†1561), een Zwitsers werktuigkundige, is het meest bekend door het bouwen van de Zytglogge te Bern. We vernemen voor het eerst van hem in 1526 ter gelegenheid van zijn aanstelling als klokmeester. De toren gebouwd in 1220, doet aanvankelijk dienst als poort in de westelijke stadsmuur. Vanaf 1344 is het een vrouwengevangenis die echter tijdens de grote stadsbrand van 1405 geheel uitbrandt. Het uurwerk geeft de toren de naam van Zytglogge. De toren, enkele malen vergroot, wordt in de vijftiende eeuw voorzien van een lantaarn, een nieuwe trap en vier decoratieve hoektorens. In 1527 krijgt Brunner van de stad de opdracht een nieuw uurwerk te bouwen. Het kost hem drie jaar om het massieve mechanisme van de astronomische klok zo degelijk te maken, dat het tot op de dag van vandaag functioneert. Na de succesvolle bouw van de klok rijst de ster van Brunner in de gemeenschap van Bern snel. Hij wordt in 1530 toegelaten tot het *Gesellschaft zu Schmieden*, waardoor hij in het openbaar een zaak kan drijven.



De Zytglogge te Bern in 1542. Naar een schildering op glas.

In 1537 wordt hij gekozen tot busmeester en beheerder van het arsenaal. In 1541 huwt hij met Anna von Graffenried, een patriciërsdochter. In datzelfde jaar wordt hij uitgenodigd naar Neurenberg, toen de grootste stad van het Heilige Roomse Rijk, waar hij wordt benoemd tot busmeester en hoofd van het stadsarsenaal. In deze functie geeft hij in 1547 een 'Tuighuisboek' uit, waarin hij onder meer een grondige uiteenzetting geeft van het gieten van kanonnen.⁶ Brunner die na de Zytglogge nooit meer een uurwerk heeft gebouwd, overlijdt in 1561. Hij werkte al naar het uitkwam als slotenmaker, smid, ingenieur, geweermaker en uurwerkmaker. Brunner is een typisch voorbeeld van een autodidactisch ingenieur op de drempel van de vroegmoderne tijd.

Voor de verspanende bewerking van hout, edelmetaal, non-ferro-metalen, hoorn, ivoor en albast is sinds de middeleeuwen een met een pedaal bewogen zogenaamde wippendraaibank beschikbaar met een alternerende (afwisselende) beweging. In kleine werkplaatsen blijft deze tot in de negentiende eeuw in gebruik. Naast de trapdraaibank is vanaf de zeventiende eeuw de draaibank met een continue draai beweging in ontwikkeling. De aandrijving vindt plaats met behulp van een staand draairad waarmee met tussenkomst van een snaar de draaiende beweging op de draaibank wordt overgebracht. De draaier kan zich nu geheel op zijn werkstuk concentreren, maar heeft wel een hulpkracht nodig om aan het rad te draaien. In de achttiende eeuw wordt zelfs een dubbelrad gebruikt, waarmee twee verschillende snelheden kunnen worden onderhouden.

Een derde oplossing voor de aandrijving is de reeds door Leonardo da Vinci ontworpen draaibank met een treeplank (trapplank) waarmee, door tussenkomst van een krukas, een vliegwiel wordt aangedreven. De aanwending van dit principe komt echter eerst in de achttiende eeuw op gang.⁷

⁵ E. Müntz, *Leonardo da Vinci. Künstler, Denker und Wissenschaftler* (Parijs 1898) (heruitgave New York 2006)

⁶ V. Schmitthen, 'Technik im Übergang vom Mittelalter zur Neuzeit zwischen 1350 und 1600' in: K.H. Ludwig und V. Schmitthen, *Propyläen Technik Geschichte 2* (Berlijn 1997) p. 318

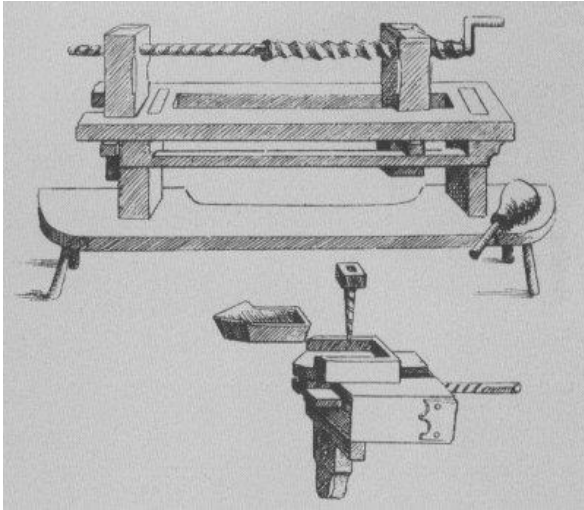
⁷ Ulrich Troitzsch, 'Technische Wandel in Staat und Gesellschaft zwischen 1600 und 1750' in: Akos Paulinyi en Ulrich Troitzsch, *Propyläen Technik Geschichte 3. Mechanisierung und Maschinsierung* (Berlijn 1997) p. 194

Belangrijke onderdelen van moderne draaibanken, zoals de beweegbare werktuigleden, het support en de geleide spil, zijn al eind vijftiende, respectievelijk midden zestiende eeuw beschikbaar, evenals het excentrisch draaien met behulp van verstelbare sjablonen.

Draaibank van de keurvorst van Beieren Max Emanuel. De draaibank uit brons, ijzer en messing samengesteld, is in 1712 gebouwd door Francois Houard, van 1711 tot 1716 in dienst van de keurvorst. De draaibank uitgerust met sjablonen is door Max Emanuel gebruikt voor het draaien van ivoor. De draaibank is nu in het bezit van het Bayerische Museum te München. (foto: Baronas)



In Frankrijk beleeft de kunst van het draaien in de laat zeventiende en in de achttiende eeuw een grote bloei, wat blijkt uit de in 1701 in Lyon verschenen *L'art de tourner* van de hand van de Fransman Charles Plumier (1646-1706), een Franciscaner monnik en botanicus, die ook wiskunde en fysica heeft gestudeerd. Het is het eerste manuscript, dat in detail ingaat op de techniek van het draaien; een hoogst prestigieuze en elitaire gesloten kunst, die zonder Plumier uit het zicht zou zijn gebleven. Met de draaibank worden de meest ingewikkelde en kunstige werkstukken gemaakt. Een bijzonder type draaibank is de guillocheermachine, waarmee de draaibeweging door middel van curvenschijven in een pendelende beweging wordt omgezet, waardoor een stalen pen variantrijke ornamenten op metalen borden en zakuurwerken krast. In de negentiende eeuw vindt het guillocheren ook in de grafische industrie toepassing. Bijvoorbeeld de slingerende lijnen op bankbiljetten zijn guilloches. Deze artistieke ontwikkeling heeft te maken met het feit dat 'L'art de tourner' vooral een liefhebberij is van adel en gegoede burgerij. Deze kunnen het zich permitteren zo'n gecompliceerde 'kunstdraaibank' te laten bouwen. Terwijl in de achttiende eeuw alle mogelijkheden die de draaibank biedt voor het maken van steeds kunstiger draai -en graveerwerk worden benut, stagneert de ontwikkeling op andere gebieden en loopt het vervaardigen van machineonderdelen, later zo bij uitstek het symbool van de industriële productie, sterk terug. Deze tegengestelde ontwikkeling is opmerkelijk, aangezien de wezenlijke onderdelen van de draaibank, de geleide spil, het beweegbare support, de beitels en de continue aandrijving voorhanden zijn. Een nadere beschouwing leert echter dat de stilstand in de ontwikkeling van de werktuigbouw een andere oorzaak heeft. De gebruikte draaibanken zijn van hout, het enige materiaal wat in voldoende mate voorhanden is om werktuigen van grotere afmetingen te bouwen. Op deze houten draaibanken kunnen alleen betrekkelijk kleine en lichte werkstukken worden gemaakt. Bij het draaien van houten onderdelen geeft dat weinig problemen en is zelfs de wippenbank, slechts aangedreven met spierkracht, toereikend. Draaien van metaal is problematischer. Aandrijving met een waterrad geeft meer aandrijfkracht en een hogere draaisnelheid, waarmee een gladder oppervlak van het werkstuk kan worden bereikt. Draaien van tin, goud en zilver geeft op een met waterkracht aangedreven draaibank nog weinig problemen, maar het hardere messing, laat staan ijzer, behoeft een groter uitgeoefende kracht op de beitel. Met een houten draaibank is dat niet goed mogelijk. Bij een hogere belasting geeft het hout te veel mee en de houten onderdelen gaan ten opzichte van elkaar wijken. Verankeren aan vloer of wand helpt wel, maar onvoldoende. De werkstukken gemaakt op houten draaibanken zijn dan ook uitgesproken onnauwkeurig.



Draaibank met op de voorgrond draaibeitel en support voor het snijden van houten draadspillen. Ca. 1480.

In geval van serieproductie is geen werkstuk gelijk aan een ander. Passingen behoeven altijd een handmatige nabewerking met de vijl. Draaibanken van gegoten en daarna bewerkte machineonderdelen, met een vaste geleide voor de bewegende delen, zorgen voor een betere maatvoering van de werkstukken. Dergelijke banken laten zich, met name vanwege de hoge kosten, slechts in kleine afmetingen bouwen. Er kunnen slechts kleine werkstukken op worden gedraaid ten behoeve van wetenschappelijke

instrumenten en uurwerken. Dergelijke draaibanken en de met trekboog of zwenkwiel aangedreven machines zijn in de regel gemaakt door uurwerkmakers.⁸

Een van de belangrijkste maar tevens het moeilijkst te maken onderdeel van een draaibank is de geleide spil vanwege het schroefdraad. Ook het snijden van draad op bouten en in moeren is een lastige klus. Ondanks dat de bevestigingsschroef al uit de antieke oudheid bekend is, vermijden de ambachtslieden veelal, ook nog aan het einde van de achttiende eeuw, vanwege de moeilijkheidsgraad de schroefverbinding. Voor 'tijdelijke' verbindingen worden keilen, voor duurzame verbindingen nagels gebruikt. Grote houten draadspillen, zoals in persen, worden op een rondhout afgetekend en met de vijl uitgevijld. Voor kleine metalen schroeven worden in de zeventiende en achttiende eeuw tot spiralen gedraaide strippen gehard blik gebruikt. De 'draad' op dergelijke schroeven wordt meer door indeuken dan door snijden bereikt en moet met de vijl worden nabewerkt. Grotere metalen spillen voor persen, lieren of bankschroeven worden gemaakt op een 'patronendraaibank'. Iedere werkplaats snijdt een ander draad. Beschadigde of verloren schroeven, bouten of moeren moeten als enkelstuks worden nagemaakt en ingepast. Dat is nogal tijdrovend, maar omdat er in het vóór-industriële tijdperk geen massale behoefte aan draadeinden bestaat en de apparaten en machines waarvoor ze nodig zijn ook slechts in enkelstuks of hooguit in een kleine serie worden gebouwd is de druk op werktuigkundigen en machinebouwers om machines te ontwikkelen waarmee uitwisselbare bouten en moeren kunnen worden gemaakt niet of nauwelijks aanwezig. Afhankelijk van de mate van precisie gaapt er nog een hele wereld tussen de fijn instrumentmakers en de machinebouwers. De machinebouwers zijn in de regel tevreden met een precisie, die met gieten of smeden kan worden bereikt. Er is een zekere vooruitgang in de eerste helft van de achttiende eeuw op een ander terrein van de verspanende bewerking: het uitboren van houten, bronzen en gietijzeren buizen.

Het is sinds de renaissance gebruikelijk om geschutslopen, horizontaal of verticaal, over een kern te gieten. Nieuw is in 1720 het boren van volgegoten ijzeren kanonlopen met een verticale boormachine door een Kasseler (D) geschutgieter. Grotere bekendheid genieten de Zwitserse geschutgieters Maritz. Reeds vader Johann (1680-1743) ontwikkelt een kanonboormachine. Zijn zoons Samuel (1705-1786) en Johann (1711-1790) zijn respectievelijk geschutgieter in Genève en Bern en inspecteur in Franse dienst van de Koninklijke gieterijen in Perigord, Straatsburg en Douai. De laatste ontwikkelt eveneens een (horizontale) boormachine met als bijzonderheid dat niet de boor maar de kanonloop draait. In 1744 komt deze machine in bedrijf. In Engeland worden horizontale boormachines ingezet voor het maken van cilinders voor atmosferische stoommachines, waarbij zowel de vinding van Johann Maritz jr. wordt gebruikt als ook de oudere methoden. De holgegote cilinder wordt met een roterende boorstang bezet met snijwerktuigen uitgeboord. Afwijkingen ten opzichte van de as van de ziel van een kleine vingerbreedte, veroorzaakt door de slingering die het waterrad of tredmolen op de boorstang uitoefent, worden als normaal beschouwd. Eerst als de ijzermagenaar John Wilkinson (1728-

⁸ Ulrich Troitzsch, 'Technische Wandel in Staat und Gesellschaft ...' p. 194-196

1808) vlak na de cilinder de boorstang van lagers voorziet wordt de afwijking gereduceerd tot de dikte van een muntje, wat voor de toenmalige verhoudingen een enorme kwaliteitsverbetering is.



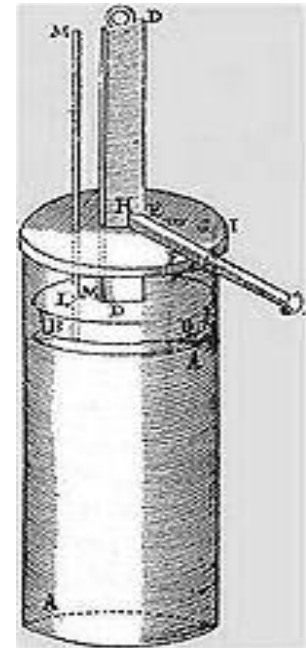
Model van een horizontale kanonboor. Het recht uitboren van kanonlopen heeft een hoge moeilijkheidsgraad. Tot in de achttiende eeuw worden de lopen daarvoor verticaal geplaatst. In het midden van de achttiende eeuw ontwikkelt Jan Verbruggen (van 1775 tot 1770 landsgeschutgieter in Den Haag) een nieuwe methode om lopen uit te boren, waarbij het kanon horizontaal kan worden gehouden. De boor wordt met paarden aangedreven. Het model, dat in de achttiende eeuw opgesteld stond in het stadhuis van Amsterdam, is nu te zien in het Legermuseum te Delft. Er is een koperen gedenkplaat op de boor aangebracht ter ere van de ingebruikname in de Haagse geschutgieterij op 8 maart 1758. (foto: Dina)

De grote vlucht van de Engelse ijzerindustrie is alleen mogelijk

doordat er een nieuwe krachtbron ter beschikking komt. De behoefte aan een nieuwe krachtbron doet zich begin achttiende eeuw vooral voelen in de mijnen van Cornwall waar men veel last heeft van grondwater. De met een watterrad of door dierkracht aangedreven pompen zijn niet in staat de mijnen droog te houden. Op 2 juli 1698 patenteert Thomas Savery (1675-1725), een Brits ingenieur, de eerste stoommachine. In 1702 publiceert hij over deze machine in het boek *Miner's Friend*. Savery's 'stoompomp' heeft geen zuiger, maar gebruikt een combinatie van onderdruk en stoomdruk om het water te verplaatsen. Door het condenseren van stoom met koud water in een gesloten pompketel, ontstaat onderdruk en drukt de buitenatmosfeer het op te pompen water in de ketel. De werking is beperkt tot het opstuwen van een waterkolom van ca. dertig voet, maar kan worden verhoogd tot ca. vijftig voet door daarna stoomdruk op het wateroppervlak van de pompketel te plaatsen en zo het water weg te drukken. De daarvoor benodigde druk in de boiler maakt de installatie echter onveilig. De bediening is handmatig en daardoor traag en onrendabel. Er wordt geprobeerd water weg te pompen uit de Broadwaters mijn in Wednesbury en vervolgens nog in Staffordshire, maar zonder succes. De machine is niet geschikt om water uit een mijn te pompen en de enig bekende werkende versie is gebruikt voor de watervoorziening in Londen. Savery komt in contact met de smid Thomas Newcomen (1664-1729), waarmee hij rond 1712 een regeling treft, waardoor diens meer geavanceerde ontwerp, dat valt binnen het patentrecht van Savery, verder kan worden ontwikkeld. Na allerlei meer of minder gelukke pogingen heeft Newcomen in 1722 zijn eerste 'vuurpomp' gereed. Deze eerste werkelijke stoommachine is een 'atmosferische' of onderdrukmaschine, omdat de atmosferische druk het werk doet. De machine van Newcomen wordt bediend door twee man: een stoker en een kranenbediener. Via een kraan wordt stoom in de cilinder gelaten. De zuiger gaat omhoog en de met een hefboom verbonden pompzuiger naar beneden. De stoomkraan wordt gesloten en de waterkraan geopend. Het beetje water dat in de cilinder stroomt zorgt er voor dat de stoom condenseert en er onderdruk ontstaat en de buitenlucht plus het gewicht van de onevenwichtige hefboom doen de rest. De stoomzuiger gaat omlaag en de aan de hefboom gekoppelde pompzuiger omhoog. De 'vuurmaschine' van Newcomen houdt in de achttiende eeuw de mijnen in Engeland droog. Het rendement van de machine is minder dan één procent en hoewel de steenkool uit de eigen mijn komt en dus weinig kost, wordt het door velen als een nutteloze energiever-spiller beschouwd. Ondanks het enorme kolenverbruik staan er alleen in de buurt van

Newcastle in 1767 al 57 van dergelijke stoompompen met tezamen 1200 pk.⁹ De machine van Newcomen werkt met zuigers die in 1690 zijn bedacht door de Fransman Denis Papin. Door combinatie van het condensatie-opzuigprincipe van Thomas Savery met de zuiger van Papin ontstaat de eerste met vuur aangedreven machine die water uit een mijn kan pompen. Als Newcomen in 1729 komt te overlijden staan er in Groot-Brittannië al een honderdtal van zijn vuurmachines opgesteld.

Tekening van de eerste zuigerstoommachine gemaakt in 1690. Een vinding van de Fransman Denis Papin .



Denis Papin (1647-1712), is een Frans wis- en natuurkundige, die het meest bekend is vanwege zijn pionierswerk met stoom. Hij is één van de grondleggers van de thermodynamica. In Parijs presenteert Christiaan Huygens een buskruitmotor, waarin hij buskruit gecontroleerd laat ontploffen. Papin, met wie Huygens heeft samengewerkt, gebruikt later het principe van de buskruitmotor om zijn stoommachine te verbeteren. In 1679 bedenkt hij de snelkookpan, een soort autoclaaf, die in de industrie al snel een papiniaanse pot wordt genoemd. Een autoclaaf is een drukvat waarin de druk wordt gebruikt om een proces te starten, te bevorderen of te stoppen. In 1681 demonstreert Papin zijn pan in Engeland en toont aan dat er onder druk, van konijnenbotten prima gelatine kan worden gemaakt. Papin bouwt ook een centrifugaalpomp met rechte schoepen. Als in 1685 Lodewijk XIV een eind maakt aan het Edict van Nantes, vluchten veel Hugenoten uit Frankrijk. Papin vlucht naar Hessen, waar hij aan de Philipps-Universiteit te Marburg probeert zijn ideeën te verwezenlijken. Als gevolg van onnauwkeurige bewerkingen van het materiaal mislukt het. Hij heeft zijn ideeën intussen voorgelegd aan de Royal Society in Engeland, waar hij Robert Boyle en Robert Hooke eerder heeft leren kennen. Hooke laat aan de hand van het ontwerp een bekwaam constructeur in 1690 een machine maken. In datzelfde jaar schetst Papin, in het wetenschappelijk tijdschrift *Acta Eruditorum*, een stoomboot uitgerust met vier cilinders om waterwielen aan te drijven. In 1707 bouwt hij een boot met schoepraderen, om de Fulda en de Wezer over te steken. De boot wordt echter vernield tijdens de strijd om de passagiersrechten met het Mündener schippersgilde die de stoomvoortstuwing als een bedreiging ziet.

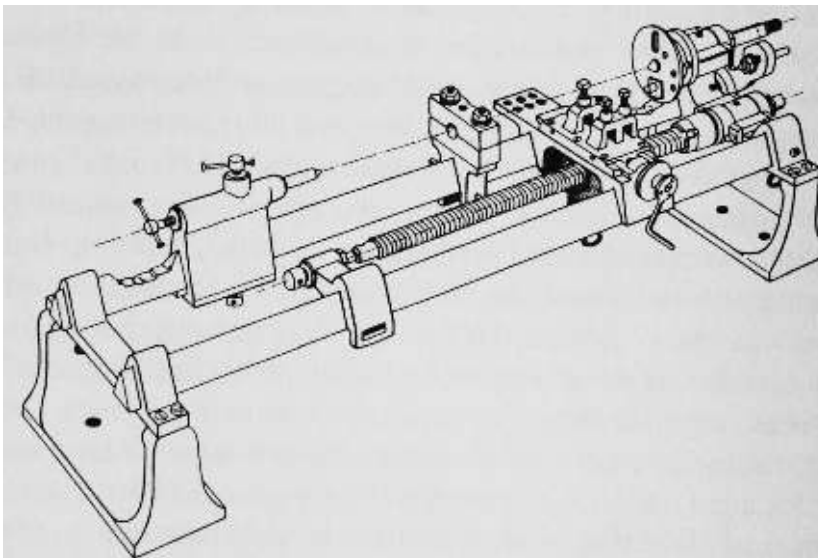
Het is de Schotse ingenieur James Watt (1736-1819) die ontdekt dat in plaats van inspuiten van water, afkoelen ook kan door de cilinder in verbinding te brengen met een koude ruimte, een condensor, waardoor veel brandstof wordt bespaard. In 1775 bouwt de ijzermagnaat John Wilkinson (1728-1808) het eerste door stoom aangedreven blaaswerk. Hij is ook de eerste die gebruik maakt van de door Watt ontwikkelde roterende stoommachine. Aanvankelijk gebruikt Wilkinson deze stoommachine voor het aandrijven van een hamer, maar vanaf 1792 ook voor het aandrijven van een walswerk. Al deze vroege stoommachines dragen nog het stempel van het vóór-industriële tijdperk. Met name het framework is van hout en alleen waar dat noodzakelijk is zijn de onderdelen van ijzer. Maar zelfs in deze nog primitieve vorm maakt de grotere drijfkracht het mogelijk meer ijzer dan voorheen te produceren. Al in 1784 staan er in Coalbrookdale zestien stoommachines opgesteld die acht hoogovens en negen grote hamers bedienen.

In de vóór-industriële tijd komt langzaam maar zeker het hele technische oeuvre ter beschikking, echter zo verspreid over verschillende machines en apparaten en over de verschillende branches, dat het een nieuwe conceptuele visie vereist, om alles wat voorhanden is bijeen te brengen. Dat gebeurt aan het eind van de achttiende eeuw door de werktuigkundige Henry Maudslay (1771-1831) en het is

⁹ E. Hijmans, *Mens, metaal, machine* (Deventer 1963) p. 49

geen toeval dat de eerste machine die hij construeert er een is voor het maken van herbruikbare schroeven.¹⁰

Maudslay, is de zoon van een invalide marineman en moet reeds op zijn twaalfde gaan werken in het arsenaal van Woolwich. Als gebruikelijk starten kinderen officieel als leerling, maar feitelijk als 'poederaapje', bijnaam van de jongste leerlingen die belast zijn met het afvullen van buskruit. Daarna worden ze als krullenjongen in de schrijnwerkerij en uiteindelijk in de smederij aan het werk gezet. Als in 1789 de Londense constructeur Joseph Bramah (1748-1814) een ijzerwerker zoekt, wordt hij opmerkelijk gemaakt op de jonge Maudslay, die inmiddels in het arsenaal een faam geniet als virtuoos vakman met hamer en vijl. Maudslay ziet af van de voltooiing van zijn zevenjarige leertijd en treedt als hulpkracht bij Bramah in dienst. De acht jaar dat hij voor Bramah werkt zijn bepalend voor zijn verdere loopbaan. Bramah is een ontwikkeld meubelmaker, begaafd ingenieur en een van de vlijtigste constructeurs van zijn tijd. Hij liet tussen 1778 en 1814 in totaal achttien uitvindingen patenteren, waaronder een wc, een zekerheidslot en een hydraulische pers. Maudslay leert hier niet alleen alle finesses van de bewerking van metaal, maar ook de grondslagen van het ontwerpen. Hij is betrokken bij het ontwerpen en maken van speciale werktuigen en werktuigmachines voor de stalen en metalen onderdelen van Bramah's zekerheidslot en ook maakt hij de problemen van het ontwerpen van de hydraulische pers mee. Hij ervaart hoe moeizaam en arbeidsintensief het is, zelfs voor de vaardigste vakman, om met handwerktuigen ijzer en metaal tot de gewenste vorm en precisie te bewerken. De jonge werkmeester werkt mee aan het streven van zijn baas, om het kostbare handwerk door werktuigmachines te doen vervangen.



Schroefdraadsnijbank van Henry Maudslay (1771-1831). Technische tekening van Volker Benad-Wagenhoff naar het origineel van 1797.

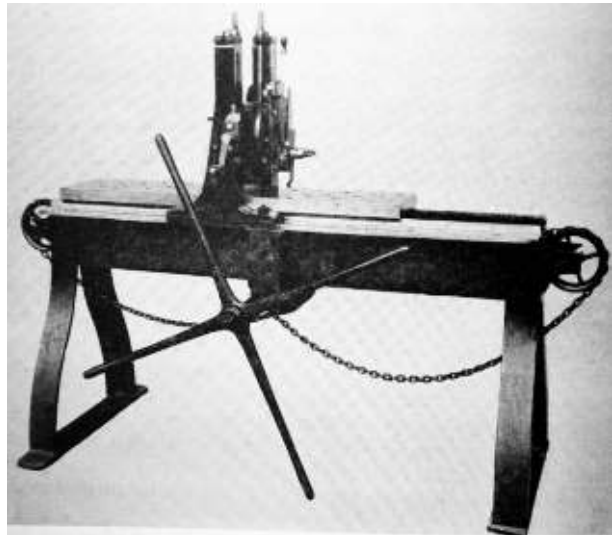
Als Maudslay in 1797 om loonsverhoging vraagt en Bramah hem dat weigert begint hij zijn eigen werkplaats. Allereerst bouwt hij voor zichzelf een schroefdraadsnijmachine. De machine dient voor het snijden van schroefdraad op schroeven en draadspillen die met de bijbehorende moer in

alle verspanende machines voorkomen, zowel ten behoeve van de langsgeleiding als voor de omzetting van een cirkelbeweging in een rechte beweging. Zelfs de eenvoudigste draaibank met een kruissupport bezit minstens drie draadspillen die tot dan met handgereedschap moeten worden gemaakt. Geen van de onderdelen die Maudslay gebruikt is nieuw, nieuw is de constructieve oplossing en om de machine geheel uit metaal te maken. De schroefdraadsnijmachine wordt door Maudslay verder ontwikkeld tot een kleine universele draaibank. Na 1815 specialiseert het bedrijf van Maudslay zich op scheepsstoommachines, waarvan de Engelse marine de grootste afnemer is. Maudslay kan ongetwijfeld gezien worden als de peetvader van de moderne werktuigmachine-industrie. Van de vijf prominentste werktuigmachinebouwers van Groot-Brittannië: Richard Roberts, Joseph Clement, James Fox, James Nasmyth en Joseph Whitworth, heeft alleen Fox niet bij Maudslay gewerkt alvorens een eigen bedrijf te beginnen. Aanvankelijk heeft iedere machinefabrikant zijn eigen maat schroefdraad, al naar gelang van de spoed waarvan hij uitgaat voor zijn sledespil en naar de

¹⁰ Ulrich Troitzsch, 'Technische Wandel in Staat und Gesellschaft ...' p. 196-97

overbrenging die hij heeft gekozen. In de werkplaats van Maudslay brengt Clement orde in de maatvoering van het schroefdraad.

Metaalschaafbank , gemaakt in de werkplaats van Maudslay door Roberts in 1817. De werktuigmachine maakt het mogelijk om machinaal platte vlakken te maken.



Later worden de hier ontwikkelde tabellen, van de verhouding tussen diameter van een schroef en zijn spoed, verder door Whitworth gesystematiseerd en vanaf 1840 wordt overal in Engeland het 'Whitworthdraad' toegepast.

De vervorming van ijzeren en metalengrondstoffen tot machineonderdelen gebeurt overwegend door gieten, smeden of buigen en door verspanen. Met gieten en smeden wordt de ruwe vorm bereikt. Met de verschillende verspanende bewerkingen: schaven, frezen en

boren en handmatig met vijlen, schrappen en schuren krijgt het onderdeel zijn eindvorm. Gieten en smeden blijft tijdens de Industriële Revolutie ambachtelijk, terwijl de bouw van werktuigmachines voor het draaien, schaven, stampen en boren in de periode 1800-1830 een aanzienlijke vooruitgang boekt en de metaalbewerking mechaniseert. Deze draaibanken, schaaftbanken, stamp- en boormachines vormen de technische basis voor de machinebouw, die als kapitaalgoederenindustrie uitgroeit tot de strategisch belangrijkste sector in de economie. Met deze werktuigmachines worden geprefabriceerde onderdelen gemaakt die door gekwalificeerde vaklieden worden afgewerkt en gemonteerd tot productiemachines.

Het ontstaan en de ontwikkeling van de (werktuig)machinebouw, hangt ten tijde van de Industriële Revolutie ten nauwste samen met de bouw van textielmachines en met die van stoommachines, die bij beide tot ca. 1830 nagenoeg gelijk opgaat. De groeiende vraag vereist het ontwikkelen van werktuigmachines die in staat zijn gelijkvormige, genormaliseerde onderdelen in grote aantallen te maken.¹¹ Met de intocht van ijzer, in de jaren negentig van de achttiende eeuw, als grondstof voor het maken van onderdelen voor spin- en kaardmachines wordt het gebrek aan capaciteit in de metaalbewerking het grootste probleem. Het traditionele handwerk kan niet aan de vraag voldoen, noch naar aantal, noch naar kwaliteit. Voor de machinale spinnerijen moeten de machines en de machineonderdelen een zekere maatnauwkeurig bezitten, terwijl het aantal benodigde machines voortdurend stijgt. Om daaraan te kunnen voldoen zijn nieuwe technieken en technische vaardigheden nodig. Naast de machinebouw door textielbedrijven in eigen beheer, komen er gespecialiseerde textielmachinebouwers. In beide typen van ondernemingen is het de werktuigkundige die de constructie van de gecompliceerde machines en werktuigen voor zijn rekening neemt in samenwerking met producenten van onderdelen. Bij het overschakelen op ijzer doen zich meerdere fabricageproblemen voor. Een aantal daarvan worden opgelost door nieuw ontwikkelde machines die slechts één product maken of slechts één soort van handeling verrichten, zoals het snijden van schroefdraad. De productie van gietijzeren ruwe onderstellen en andere dragende constructies, alsook ringen, haardtrommels en tandraden leveren technisch noch kwantitatief noch kwalitatief grote problemen op. Het probleem is de verspanende bewerking (o.m. schaven en draaien) van de in grote hoeveelheden benodigde onderdelen als spullen en strekbomen. Ook kost het de grootste moeite om in het massaverbruik van beslag van kaardtrommels te voorzien.¹²

¹¹ Akos Paulinyi, 'Die Umwälzung der Technik in der Industriellen Revolution zwischen 1750 und 1840' in: Akos Paulinyi en Ulrich Troitzsch, *Propyläen Technik Geschichte 3. Mechanisierung und Maschinsierung* (Berlijn 1997) p. 321

¹² Kaarden is het bewereken van vezels ten behoeve van een te spinnen stof door middel van een kaarde te ontwarren en evenwijdig te leggen.

Over de productie van spullen is weinig bekend. Ze zijn van smeedijzer of staal, moeten goed rond zijn en goed gepolijst. Bij gebruik van smeedijzer is het onderste deel van de spil, die als tap fungeert: gehard. De onbewerkte spullen moeten een verspanende bewerking ondergaan om rond en glad te worden. Aanvankelijk wordt gebruik gemaakt van draibanken met handaandrijving, maar al spoedig – in 1810 – komen er draibanken met werktuigleden. Gespecialiseerde fabrikanten in het maken van spullen en spillagers zijn dan al actief. Complicerend is de gelijktijdigheid van een groeiende vraag en de eis tot normalisatie en maatnauwkeurigheid om eenvoudige vervanging mogelijk te maken.



Detail van een spinmachine, een z.g. 'selfactor', gebouwd bij Houquet Ateliers te Verviers in 1925. Een selfactor is een wagenspinmachine met een stilstaande spullenwagen en beweegbare voorgarenklossenwagen. De machine is in bedrijf geweest bij de spinnerij en weverij van André van Spaendonck te Tilburg en staat nu opgesteld in het Nederlands Textielmuseum. (foto: Dina)

Met uitzondering van de 'Jenny' werken alle machines in de voor- en fijnspinnerij met strekwerken. Voor elke spil is er een strekwerk met tenminste drie cilinderparen nodig. Tussen 1789 en 1810 groeit de capaciteit van de spinnerijen

met naar schatting 2,3 miljoen spullen, anders gezegd met 13,8 miljoen cilinders, ca. 650.000 per jaar. De helft daarvan, de onderste voor het hekelen, zijn cilinders met een lengte van 40 tot 50 mm en een doorsnede van 25 tot 38 mm. Het aantal aan langsassige, later schroefvormige, groeven per cilinder varieert tussen de 45 en 55 al naar gelang de doorsnede. Met een verdere groei in het vooruitzicht mag worden aangenomen dat voor de verspanende bewerking van genormaliseerde en uitwisselbare onderdelen al spoedig machines, zoals de in *Rees's Cyclopedie* van Abraham Rees (1743-1825), docent en dominee te Wales, vermelde 'Curious Machines' zijn ontwikkeld. Voor het afdraaien voldoen de in de andere takken van de machinebouw gebruikelijke supportdraibanken.

In de Royal Portsmouth Dockyard is in de jaren rond de eeuwwisseling van de zeventiende naar de achttiende eeuw sprake van grote drukte. De lange oorlog met het republikeinse Frankrijk legt een zware tol op materiaal en arbeidskracht bij het bouwen van grote aantallen oorlogsschepen. In de laatste vijf jaar van de achttiende eeuw is de vloot met ruim 200 schepen uitgebreid tot in totaal 864. Dat de werf zo'n hoge productie aan nieuwbouw, reparatie en reconstructie volbrengt is vooral te danken aan de ongelooflijke inspanningen van de scheepstimmerlieden, geholpen door de technische ontwikkeling aan het begin van de Industriële Revolutie van stoommachine en cirkelzaag. De man verantwoordelijk voor deze innovatie in Portsmouth is Samuel Bentham (1757-1831), een toekomstgerichte scheepsingenieur en timmerman, in 1796 benoemd tot inspecteur-generaal van de marinewerf. Bentham combineert de talenten van uitvinder, ambachtsman en bestuurder en slaagt er in, soms tegen de conservatieve opvattingen van de Admiraliteit in, de werf volledig te reorganiseren waardoor de efficiency sterk verbetert, maar het knelpunt van een onvoldoende productie van blokken kan ook hij vooralsnog niet oplossen. De productie van blokken moet opgevoerd worden naar 100.000 per jaar. Een schip met 74 kanonnen voert niet minder dan 922 blokken in zijn tuig en dat is dan nog maar een derdeklasschip. De productie blijft achter bij de vraag, omdat er grote aantallen geschoolde houtbewerkers nodig zijn en het maken van blokken een groot aantal tamelijk ingewikkelde handelingen vraagt. De werf komt domweg capaciteit tekort. Marc Isambard Brunel (1769-1849), een man die later wordt geridderd voor prestaties als de bouw van de eerste Thames Tunnel, is geboren en

getogen in Normandië, maar neemt na het uitbreken van de revolutie vanwege royalistische sympathieën, de wijk naar de Verenigde Staten. In New York ontwerpt en begeleidt hij, als hoofdingenieur, naast de bouw van vestingwerken, een arsenaal en een gieterij. Zijn fascinatie is mechanisering en de noodzaak van het produceren van grote aantallen uniforme grote blokken ziet hij als een uitdaging en hij ontwikkelt een gemechaniseerde productiestraat.¹³ In 1798 verhuist hij naar Engeland en huwt Sophia Kingdom, die hij heeft leren kennen in Frankrijk. In de jaren daarna werkt hij zijn ideeën verder uit en verwerft in 1801 een patent op 'blockmaking machinery'. Zijn volgende stap is het maken van modellen voor potentiële fabrikanten. Brunel maakt kennis met Henri Maudsley, die in die tijd al een grote reputatie heeft van precisie en vaardigheid. Een van de eersten die de door Maudsley gemaakte modellen ziet is de broer van Sophia, die ondersecretaris is bij de Admiraliteit. Hij stelt voor om met Samuel Taylor, sinds 1759 toonaangevend leverancier van blokken aan de Britse marine, contact op te nemen. Het leidt tot een van de meest kortzichtige beoordelingen aller tijden. Taylor oordeelt over het ontwerp als van geen enkele waarde.

"My father", schreef hij, "has spent many hundreds a year to get the best mode, and most accurate, of making blocks, and he certainly succeeded; and so much so that I have no hope of anything ever better being discovered, and I am convinced that there cannot. We are, as you know, so much pressed, and especially as the machine your brother-in-law has invented is wholly yet untried. Inventions of this kind are always so different in a model and in actual work. Believe me dear Kingdom, Yours in great truth, Samuel Taylor"



Een blok of katrol is een apparaat om touwwerk in verschillende richtingen te kunnen leiden. Ze worden ook gebruikt als onderdeel van takelconstructies en talies. Een blok is van hout en wordt naar het aantal schijven: één-, twee-, drieschijfsblok, enz. genoemd. Een blok kan uit één stuk worden gemaakt, maar gebruikelijker is een constructie die bestaat uit twee wangen die door dammen op een vaste afstand worden gehouden, terwijl bij meerschijfsblokken de schijven door dunne schotjes worden gescheiden. Het geheel is verstevigd en verbonden met houten pennen. Houten blokken zijn gestropt, dat wil zeggen: door een touwenstrop of grommer omvat, die in de neuten (gleuven) van de wangen wordt ingelaten, of van ijzeren beslag voorzien, met een haak of draaiende nok. De schijven zijn van pokhout en draaien om een nagel of bout, die door de wangen en schijven gaat. Zeilschepen hebben een zeer groot aantal blokken in de tuigage (enige honderden) van verschillende vorm en grootte.

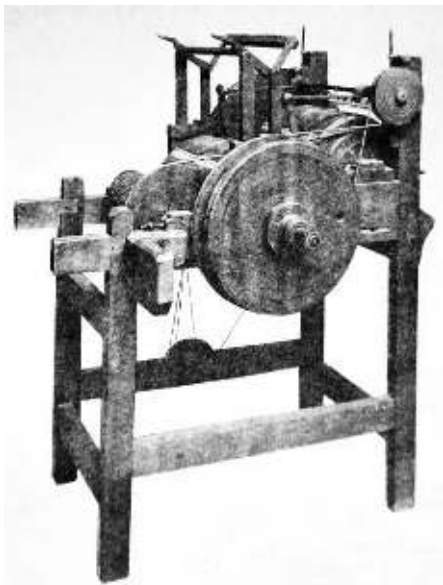
Deze tegenslag is slechts van een tijdelijk karakter. Brunel heeft een effectief, revolutionair systeem bedacht en heeft de hulp van de meest getalenteerde werktuigbouwer van zijn tijd om zijn ontwerp praktisch vorm te geven. Het enige wat nog nodig is, is een invloedrijke persoon die ervoor kan zorgen dat de productielijn een eerlijke kans krijgt. Deze persoon is Samuel

Bentham, die na bestudering van de modellen de Admiraliteit er van overtuigt om de machines te laten installeren. Vier jaar later maken Brunel's machines alle blokken voor de Britse marine. Zijn jaarproductie is dan 160.000 blokken. De betekenis van 's werelds eerste gemechaniseerde productielijn is moeilijk te overschatten. Rees's Cyclopedica, gepubliceerd in 1819, vermeldt dat Brunel's machines niet alleen een beter product maakt, maar ook sneller en bovendien goedkoper is. Sneller en goedkoper - tien ongeschoolde werklieden vervangen 110 geschoolde – is zacht uitgedrukt en slechts een deel van het verhaal. Brunel is niet alleen een pionier in mechanisering, maar ook in materialen en technische innovaties. De machines te Portsmouth zijn de eerste van een substantiële omvang die volledig van metaal zijn, met als resultaat een nieuwe standaard in nauwkeurigheid. De

¹³ E. Hijmans, *Mens, metaal, machine* (Deventer 1963) p. 67

werktuigen vertegenwoordigen het resultaat van de ontwikkeling van bestaande machines als: draaibank, boormachine en cirkelzaag, maar ook die van nieuwe vindingen als: gatensteekmachine, conische koppeling en splitmoer. Met het verdwijnen van de zeilvaart verliest ook de blokmakerij zijn betekenis. De blokken productielijn van Brunel is nu nog slechts een museumstuk, maar de vele vernieuwingen die hij toepaste vinden we terug in elke werkplaats, fabriek of timmerwinkel.

Een artikel dat de textielindustrie in grote aantallen wordt verbruikt is het beslag op kaardtrommels. Het tot in de jaren tachtig van de achttiende eeuw met de hand gemaakte kaardbeslag vormt al snel vanwege het hoge verbruik een rem in de productie. Voor een kaardtrommel zijn elf bladen kaardbeslag nodig. Op een vlak van één vierkante meter staan ongeveer 660.000 haken. Er worden drie eenvoudige machines ontwikkeld, voor het schalen van leer, voor het doorsteken van leer en een voor het buigen van haken. De haken worden met de hand in het leer bevestigd. In 1811 patenteert Joseph Ch. Dyer (1780-1871) in Groot-Brittannië een in de VS ontwikkelde machine, die zowel handmatig als met een krachtwerktuig kan worden aangedreven, die alle handelingen achtereenvolgens, van draadknippen tot haken inzetten, kan uitvoeren. Volgens gegevens uit de jaren twintig van de negentiende eeuw zet per uur, ieder van de 80 machines in de fabriek van Dyer, 7.800 resp. 15.600 haken. In 3,8 uur betekent dat een kaardblad van een vierkante voet.



Kaardmachine van Arkwright uit 1775. In de opkomende machinale katoenspinnerij moet de katoen een reeks bewerkingen ondergaan om de vezels in gelijke richting te leggen en gelijkmatiger te verdelen. Op de kaardmachine worden de vezels door een met fijn staal draad bezette cilinder uitgekamd tot een 'vlies', om daarna tot een lont ineen te worden gedraaid.

Er bestaat geen twijfel over, dat op het laatst van de achttiende eeuw, de almaar groeiende vraag naar ijzeren textielmachines een revolutie in de werktuigmachinebouw bewerkstelligt. Verbeteringen in de constructie van werktuigmachines zorgen er op hun beurt voor dat er betere spinmachines worden gemaakt. De constructie van werktuigmachines en spinmachines zijn complementair aan elkaar. Leidende textielmachinefabrikanten als Dobson en Barlow laten aan hun klanten weinig speelruimte voor eigen wensen. Ze bieden standaardmachines aan met als enig verschil het aantal spinnen. Voor de belangrijkste producten: spinnen, strekmechaniek en aandrijfsysteem, gelden nauwe toleranties. Het zijn genormeerde en uitwisselbare massaproducten. De afstand tussen de spinnen is eveneens genormeerd, wat er toe leidt dat de gietijzeren of houten draagconstructie eveneens wordt gestandaardiseerd. Er kan nu op voorraad worden geproduceerd. Gietmodellen zijn meermalen te gebruiken, waardoor sneller op een nabestelling kan worden gereageerd en de productiekosten kunnen worden laag gehouden. De machinale fabricage, voor welhaast elk voorkomend cilindrisch, vlak of schroefvormig ijzeren of stalen onderdeel begint aan het eind van de achttiende eeuw met het prototype van de industriële productie: de draaibank en schroefdraadsnijmachine van Henry Maudslay.¹⁴

de bakermat van de moderne ijzerindustrie

Het dal van de Severn in Engeland is de bakermat van het 'moderne' gietijzer en daarmee de geboorteplaats van de 'Industriële Revolutie'. Het diepe dal, nu bekend als de Ironbridge Gorge, is

¹⁴ Akos Paulinyi, 'Die Umwälzung der Technik in der Industriellen Revolution ...' p. 327-8

15.000 jaar geleden ontstaan in een ijstijd. Een doorbraak door de kalkzandsteenformaties bij Wenlock Edge verbindt twee rivieren, die nu de loop van de Severn vormen. De doorbraak vormt niet alleen de Gorge, maar zorgt er tevens voor dat de aardlagen met belangrijke delfstoffen, de rijkdommen van de vallei: kalkzandsteen, ijzererts, kolen en klei, bereikbaar worden. De plaats die nu bekend staat als Ironbridge luistert eertijds naar de veelzeggende naam van Coalbrookdale. Het is hier dat de moderne ijzerindustrie zijn start vindt. Resten van de originele bedrijven waar het eerste moderne gietijzer is geproduceerd zijn nu nog te bezoeken in de musea in en rond Ironbridge.

Al in 1528 probeert kardinaal Thomas Wolsey (1471-1530), invloedrijk Engels staatsman tijdens de regering van Henry VIII, looderts met steenkool te smelten. Vanaf de zestiende eeuw wordt in Engeland brons gesmolten met kolen. De Duitse hertog Julius von Braunschweig gebruikt steenkool voor verwarming en in de smederij. De hertog is een vernieuwer die, nadat hij in 1568 aan de macht is gekomen, zijn hertogdom doet overgaan naar de Reformatie en een economische politiek voert die de mijnbouw en de gieterijen stimuleert. Ook zorgt hij voor het verbeteren van de infrastructuur. Bij zijn overlijden in 1589 laat hij een welvarend en financieel gezond vorstendom na. In 1603 ontwikkelt Hugh Platt, een inlegger van groente en fruit, een procedé voor het maken van briketten uit steenkool, bekend als cokes, voor de brouwindustrie. In Engeland worden de proeven om metaal met steenkool te smelten talrijker vanwege de voortgaande ontbossing van het land. In 1611 ontvangt Simon Sturtevant een patent voor het smelten van metalen met behulp van 'pit-coal'.¹⁵ Sturtevant heeft gestudeerd te Oxford en is docent klassieke talen en rector aan verschillende scholen. In 1608 verwerft hij een patent voor het maken van aardewerk buizen en is hij ondernemer. Ondanks zijn ambities slaagt hij er niet in metaal te smelten met kolen en moet hij zijn patent inleveren.

Gezicht op de 'Upper Works' te Coalbrookdale in 1758. Naar een handgekleurde gravure van François Vivares. Een ijzeren stoommachinecilinder wordt met paardentractie vervoerd. In het midden de fabrieken van Darby. Rechts zien we Dale House waar de Darby's woonden. Rechts op de voorgrond wordt cokes gemaakt van smeulende hopen steenkool.

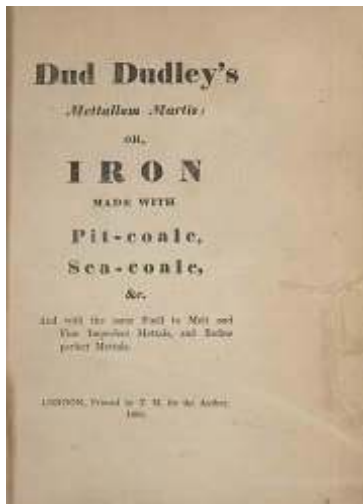


Dud Dudley (1599-1684) is een 'onechte' zoon van Edward Sutton baron Dudley, die er niet toe komt met zijn moeder, Elizabeth Tomlinson

een dochter van een houtskoolbrander, te trouwen, wat haar niet belet hem elf kinderen te schenken. Dudley, de vierde van het elftal, krijgt een degelijke opvoeding en gaat zelfs studeren in Oxford, maar wordt door zijn vader vervroegd van school gehaald om diens ijzermolen en hamerwerken te Pensnett Chase te beheren. Deze fabrieken leveren ijzer aan de pakweg 20.000 smeden die in Dudley en omgeving werkzaam zijn. De zaken gaan evenwel achteruit, omdat de bossen, nodig voor de houtskoolfabricage, langzamerhand uitgeput raken. Dudley zoekt naar een oplossing en hij weet dat de pogingen om met steenkolen ijzer te smelten tot dan toe zijn mislukt. Hij weet echter ook wat de oorzaak is: zwavel. Hij richt een fabriek in die volgens zijn methode ontzwavelde kolen maakt. Het zit hem niet mee, want na ruim een jaar wordt zijn fabriek bij een overstroming weggespoeld, maar hij bouwt het bedrijf opnieuw op. Het door hem geproduceerde ijzer stuurt hij ter keuring naar de Tower in Londen, waar wordt vastgesteld dat het van goede kwaliteit is. Bovendien slaagt Dudley erin zijn ijzer goedkoper te produceren dan zijn concurrenten, die uit nijd, dat ze niet achter zijn geheim kunnen

¹⁵ O. Johannson, *Geschichte des Eisens* (Düsseldorf 1953³) p. 295

komen, zijn bedrijf overvallen, de blaasbalgen in stukken snijden en de ovens vernielen. De vijandigheden herhalen zich, zodat Dudley zich genoodzaakt voelt de streek te verlaten. Maar ook op de nieuwe plaats, Himley in Staffordshire, waar hij met veel moeite een nieuwe hoogoven bouwt, wordt hij overvallen en opnieuw moet hij vluchten. In 1626 bouwt hij opnieuw een bedrijf op onder de naam Hascod Furnace bij Askew Bridge te Gomal. Zijn schulden kan hij echter niet meer betalen en hij wordt in gijzeling genomen. Na twee jaar komt hij vrij en verkrijgt weer een patent voor het fabriceren van ijzer met behulp van kolen. Hij richt nogmaals een ijzermolen op, maar de burgeroorlog waarin Engeland verzeilt raakt gooit roet in het eten. Dudley is de koning trouw, neemt de wapens op, ondanks zijn 44 jaar en neemt aan alle veldslagen deel, wat hem menige verwonding oplevert. Hij klimt op tot generaal der artillerie. De partij van de koning verliest de strijd en Dudley ondergaat hetzelfde lot als de vorst en wordt gevangengenomen. Hij weet te vluchten, gaat naar Londen, wordt opnieuw gevangengenomen en ter dood veroordeeld, maar neemt wederom de benen. Na de nodige omzwervingen weet hij zich in Bristol, onder de schuilnaam Dr. Hunt, een aantal jaren buiten de aandacht te houden. Als in 1660 de monarchie wordt hersteld, verwacht Dudley dat hij zijn patent voor het maken van ijzer wel zal terugkrijgen, maar koning Karel II, heeft andere zorgen en te weinig belangstelling voor zo iets triviaals als een ijzerwinning van een getrouwe onderdaan en wijst het patent af. Dudley zet nu zijn leven met niets doen voort en overlijdt op 85 jarige leeftijd. Zijn geheim van het ontzwaren van kolen neemt hij mee in zijn graf.¹⁶



Dud Dudley geeft in 1665 onder de titel Metallum Martis or Iron made with Pit-coale, Sea-coale &c. een boekje uit. Het is in de jaren na 1660 het enige wat hij nog produceert op het gebied van ijzer. Maar ook in dit schrijven geeft hij zijn geheim van het ontzwaren van steenkool niet prijs.

In 1708 vertrekt Abraham Darby, quaker en messinggieter, uit Bristol en vestigt zich in Coalbrookdale. Een jaar later slaagt hij er in ijzer te smelten met goedkope kolen in plaats van dure houtskool. De ijzerindustrie in Engeland is in die jaren op sterven na dood aangezien houtskool een schaars en duur artikel is geworden. Hele gebieden, zoals die te Sussex, zijn ontbost. Darby kent de techniek om met kolen te smelten van de 'Brassworks' in Bristol. Anderen hebben vóór Darby getracht ijzer te winnen met behulp van kolen. Het is de zwavel in de kolen die de pogingen om ijzererts te smelten met behulp van kolen

tot dan toe, naar het schijnt met uitzondering van Dud Dudley, doen mislukken. De Gorge helpt Darby een handje. De in de Gorge gedolven 'Sweet Coal' is zwavelarm. Darby staat met zijn ontdekking aan de wieg van de Industriële Revolutie. Zijn gietijzer zal de wereld van aanzien doen veranderen, ook al zijn de eerste producten simpele gietijzeren potten en andere huishoudelijke waren.

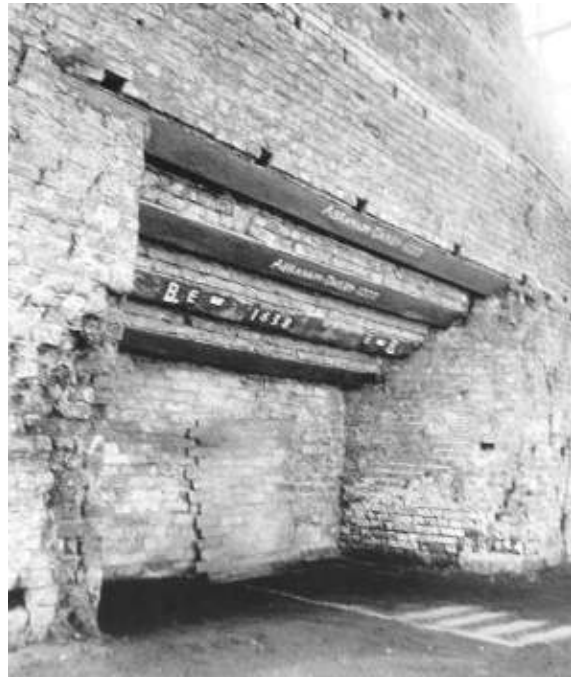
Abraham Darby (1677-1717) is geboren in dezelfde streek als Dud Dudley op de pachtboerderij van zijn vader in de buurt van Dudley. Naast de boerderij drijft zijn vader ook een nagelsmederij. Darby is leerling bij een moutmolenbouwer, maar heeft al op de leeftijd van 21 jaar zijn eigen bedrijf: een draadtrekkerij. Hij is dan ook al gehuwd. Als in 1701 de Spaanse Successieoorlog uitbreekt, veroordeelt Darby deze aangezien hij net als alle quakers pacifist is, maar het is hem ook duidelijk dat een oorlog de vraag naar ijzerwaren doet groeien. In 1703 start hij een gieterij voor het gieten van potten aan de Cheeselane te Bristol, waar hij een jaar later tracht potten van ijzer te gieten, maar hij faalt.

In 1704 maakt hij volgens Britse analen een studiereis naar Nederland, maar het is niet duidelijk naar welke plaatsen dat zou zijn gegaan. Vermoedelijk klopt dit niet en reist hij naar Stolberg in Noordrijn-Westfalen om de techniek van kolengestookte ovens en de productie van grote bronzen potten af te kijken. Stolberg is in die tijd een centrum van messinggieters. Darby werft een aantal ervaren metaalgieters, sommige met hun familie en neemt hen mee naar Bristol waar ze te werk worden gesteld bij de Baptist Mill de gieterij van Darby en later bij de Keynsham Works. De migratie van de

¹⁶ J. Semjonow, *De rijkdommen der aarde* (Amsterdam z.j.) p. 409-10

metaalgieters heeft mede als achtergrond dat zij katholiek zijn en het protestantse Duitsland wel de rug toe willen keren. Ze gaan mee naar Engeland onder het beding van geloofsvrijheid. Aan de voet van de Ashley Hill wordt een ruimte ingericht tot kerk voor de katholieke eredienst. Met behulp van deze vaklieden experimenteert Darby met het gieten van ijzer in zand in plaats van in leem. De experimenten mislukken en vormen zo de opmaat voor zijn verhuizing naar Coalbrookdale in Shropshire, waar hij in 1708 een oude hoogoven pacht.

Het 'Upper Furnace' in Coalbrookdale, Shropshire. Op deze plek smolt Abraham Darby I in 1709 met succes ijzer met behulp van cokes. Abraham Darby III, vergroot de oven in 1777 en smelt hierin het ijzer voor het maken van de beroemde ijzeren brug over de rivier de Severn. (foto: Dina)



De omgeving van Coalbrookdale is rijk aan ijzererts en steenkool. Het is zijn wens om gietijzeren producten uit zelf gewonnen ruwijzer te maken. Darby begint het smeltbedrijf met houtskool, maar in 1709 verdwijnt de kostenpost van houtskool uit zijn boekhouding, wat er op wijst dat hij in dat jaar is overgegaan op steenkool of cokes. Meer is niet bekend over de uitvinding van de cokeshoogoven. Zonder twijfel is Darby bekend met de eigenschappen van steenkolen-cokes. Of hij van de ondernemingen van Dud Dudley waarin deze ijzer met cokes smolt, gehoord of gelezen heeft is niet bekend, maar aangezien Darby in de omgeving van Dudley is opgegroeid en in de Quakerfamilie veel werd gelezen, ligt het wel voor de hand. Sterker nog, Darby is familie van Dudley, aangezien de oudere zuster van Dudley zijn overgrootmoeder is.¹⁷ Er zal ongetwijfeld binnen de familie wel iets zijn blijven hangen van Dudley's experimenten. Cokes wordt dan al in de mouterij en in de kopermakerij gebruikt. Het is derhalve aannemelijk, dat Darby meer ervaring met cokes heeft en minder last van vooroordelen dan de gevestigde ijzersmelters. Hoe hij het probleem van zwavel heeft opgelost is niet overgeleverd. Ondanks zijn achtergrond en de praktisch verworven kennis in het smeltbedrijf, beschikt hij niet over de kennis, dat zwavel, tijdens het hoogovenproces, afhankelijk van de chemische samenhang van cokes, ijzererts en kalk, bij een langere procesvoering en hoge temperatuur, zich het succesvolst laat afscheiden. Er kan een portie geluk bij gekomen zijn, bijvoorbeeld de in vergelijking met elders gewonnen steenkool geringe zwavelgehalte van 0.5% van de plaatselijke kolen, die vanwege die eigenschap 'sweetcoal' wordt genoemd. In ieder geval staat vast dat Darby de eerste is, die in de hoogoven ijzererts met cokes heeft gesmolten. Van een krachtige verspreiding van de nieuwe productiemethode is echter vooralsnog geen sprake.

De Darby's produceren alleen ijzerwaren; keukengerei, zoals driepotige ketels en potten en later ook de cilinders voor Newcomen's stoommachines. In aanvang vermengt Darby de cokes nog met houtskool, later ook met turf. Hij heeft met zijn ijzer succes en staat op het punt een vermogend man te worden als hij, nog maar veertig jaar oud, overlijdt. De oudste van zijn twee zoons is dan zes jaar oud, maar zal als Abraham Darby II de meest beroemde worden van de familie. Als hij negentien jaar oud is gaat hij ook aan de slag in het hoogovenbedrijf, maar aangezien zijn vaders bedrijf onder de leiding van een bloedverwant ten gronde is gegaan kan hij van voren af aan beginnen. Na een moeizame periode van experimenteren slaagt hij er in 1735 in om cokes te maken en met deze cokes een goede kwaliteit ruwijzer te produceren. Een kwart eeuw lang smelt hij ijzer op cokes. In deze periode vindt het met cokes smelten overal in Groot-Brittannië ingang. Zijn zoon, Abraham Darby III, komt na het overlijden van zijn vader, op achttienjarige leeftijd aan het hoofd van de fabriek te staan.

¹⁷ C. Higgs, *Dud Dudley and Abraham Darby; Forging New Links*

Hij bouwt het bedrijf uit tot een van Englands grootste gieterijen van de achttiende eeuw. Hij is het die als eerste een gietijzeren brug bouwt, niet ver van zijn bedrijf, over de Severn. Het gevaarte heeft een spanwijdte van 100 voet en is zo hoog dat barges er onderdoor kunnen varen.¹⁸



De Ironbridge over de rivier de Severn in Coalbrookdale, thans Ironbridge genaamd. Naar een schilderij van William Williams uit 1780. Voor meer dan 150 jaar is dit schilderij als verloren beschouwd. In 1992 dook het schilderij op en kon The Ironbridge Gorge Museum het verwerven.

In het Gorge Museum in Ironbridge stond enige jaren geleden een bord waarop te lezen viel dat de ontwikkeling van het ijzer even belangrijk is als bijvoorbeeld de

bouw van de piramides in Egypte. In eerste gedachte lijkt het een overschatting om zo iets gewoons als gietijzer op gelijke hoogte te stellen met één van de zeven wereldwonderen. Als je er wat langer over nadenkt is het dat niet. De rol van gietijzer is zelfs belangrijker. Het heeft de wereld wezenlijk van aanzien veranderd, wat je van de piramides niet kunt zeggen. Alle omstandigheden die uiteindelijk tot succes leiden zijn in de Gorge aanwezig: waterkracht, transportmogelijkheden over water, kolen, erts en kalksteen voor de toeslag. Het duurt evengoed toch nog zes jaar voor Darby een goed product levert en dan nog voor een beperkte markt. Gietijzer is bros en niet goed smeedbaar en alleen geschikt om mee te gieten. Eerst nadat ontdekt is hoe op een effectieve wijze het koolstofpercentage (frissen) kan worden verlaagd, komt er een 'taaiër' soort ijzer op de markt, dat ook als smeedijzer bruikbaar is.

Uit het voorgaande mag blijken, dat de Industriële Revolutie allerm minst een 'revolutie' is, maar een ontwikkeling van jaren en jaren. Het meest interessante is, dat de min of meer parallelle gebeurtenissen elkaar beïnvloeden en versterken. De samenhang laat zich niet in een paar woorden duiden, daarvoor is het te complex. Het is een spectaculaire evolutie, vanwege zijn duurzame en indringende invloed op de samenleving, maar geen revolutie wat immers een fundamentele verandering met onmiddellijke ingang betekent. In één adem met de ontwikkelingen in de ijzerindustrie moeten genoemd worden, de ontwikkeling van de mijnindustrie en de ontwikkeling in het transport. De ontwikkeling van de mijnindustrie komt in een versnelling als er pompen op stoomenergie toegepast gaan worden. Daarmee kan het grondwater worden weggepompt en wordt het mogelijk op grotere diepte steenkool te delven. Het groeiende gebruik van mijnbouwproducten veroorzaakt een groeiende behoefte aan transportcapaciteit. De aanleg van kanalen voorziet daar in eerste instantie in, maar stoomtractie, die mogelijk wordt door de ontwikkeling van de ijzerindustrie en de innovaties in de stoomtechniek, geeft nieuwe impulsen. Ook de opkomende textielindustrie draagt met innovaties bij aan de vele veranderingen. Er komen nieuwe machines; zoals het Waterframe en de Spinning Jenny. Het aanwenden van stoomkracht met daaraan gekoppeld de vele drijfriemen van de weef- en spinmachines brengt de productiviteit snel omhoog.

De oorspronkelijk houten weefgetouwen en spinmachines krijgen ijzeren opvolgers. Is de spincapaciteit eerst te klein voor de zich alsmaar uitbreidende weefcapaciteit (door introductie van de schietspoel i.p.v. de smietspoel); na invoering van de Spinning Jenny wordt er nu méér draad

¹⁸ J. Semjonow, *De rijkdommen der aarde* (Amsterdam z.j.) p. 411-12

gesponnen dan de weefgetouwen kunnen verwerken. De weefcapaciteit wordt uitgebreid en krijgt weer een voorsprong en zo gaat het spel van haasje over spelen nog een tijdje door; enerzijds door uitbreiding van het aantal spinnen en getouwen en anderzijds door technische verbeteringen. Bediende een wever in het midden van de negentiende eeuw één getouw, aan het eind van de eeuw zijn dat er al zes. Het zal verder oplopen tot meer dan twintig machines, terwijl de capaciteit per machine ook almaar groeit.

Het Paleis voor Volksvlijt is gebouwd in de jaren 1859-1864. De gevels van het gebouw, geïnspireerd op het Crystal Palace te Londen, zijn hoofdzakelijk van ijzer en glas. In 1929 gaat het gebouw door brand verloren. Opmerkelijk genoeg blijven uitsluitend de gietijzeren kolommen en de omgangsgalerij, geleverd door de DRU te Uft, overeind. De restanten van het Paleis zijn gesloopt ten behoeve van de bouw van de Nederlandsche Bank.



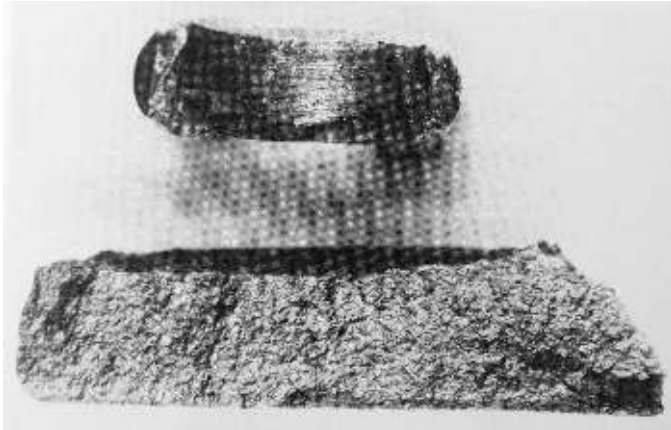
Ook andere industrieën komen op. Soms door nieuwe behoeften, maar ook door gebruik te maken van de 'restcapaciteit'. De kleisteen, bijproduct van de kolenmijnen

kan prima worden verwerkt in de aardewerkindustrie. Op hun beurt gebruiken deze industrieën weer ijzeren machines en stoomkracht dus energie uit kolen om hun producten te bakken. Je kunt zeggen dat de 'Industriële Evolutie' zijn basis vindt in ijzer en kolen. Samen maken ze de (stoom)machines. Ze leveren de energie en de apparatuur. De negentiende eeuw zou je met enige dichtertelijke vrijheid het ijzeren tijdperk kunnen noemen. Gietijzer, aanvankelijk alleen aangewend voor huishoudelijke attributen als: potten en pannen, krijgt een steeds bredere aanwending. Het meest in het oog springend is het gebruik als constructiemateriaal van bruggen, stationoverkappingen en grote hallen zoals het Paleis van Volksvlijt te Amsterdam of het Crystal Palace in Londen. 'Wolkenkrabbers' zoals het beroemde New York Statebuilding worden mogelijk vanwege de toepassing van staalconstructies. Ook veel 'straatmeubilair' is van gietijzer. Voorbeelden daarvan zijn de lantaarnpalen rond het Paleis op de Dam in Amsterdam of op het Bickerseiland, eveneens te Amsterdam. Deze lantaarnpalen zijn afkomstige van de voormalige gieterij De Prins van Oranje te 's-Gravenhage. Het doel van de ijzerwinning is sinds de verbreiding van de hoogoven in de zestiende eeuw de fabricage van technisch ijzer in twee verschillende kwaliteiten: ruwijzer (en het daaruit vervaardigde smeedbare ijzer) en staal. Dit doel wordt door technische behandeling van de grondstof en de daarop aansluitende materievervorming door smelten, gieten en omvormen door smeden of walsen bereikt. Aan dit productiedoel is tijdens de Industriële Revolutie geen verandering gekomen. Wel zijn de productiemethoden, de technische inrichting, de grootte van de oven en de omvang van de productie sterk veranderd.

over hete lucht en fris ijzer

De weg van erts tot smeedbaar ijzer vergt in het hoogovenproces twee materieveranderingen. De eerste is het smelten van het erts met als resultaat ruwijzer met een koolstofgehalte tot 4,5%. Vervormen van ruwijzer is alleen mogelijk door middel van smelten en gieten. De gietproducten zijn evenmin smeedbaar. Smeedijzer, frisijzer, tegenwoordig staal wordt uit ruwijzer gemaakt door een

tweede materieverandering, het zogenaamde frissen. Doel van het frissen is het verlagen van het koolstofgehalte tot 0,1%. Het frisijsijzer is zowel koud als warm te vervormen door middel van smeden, walsen of persen en met herhaald verhitten te verwerken tot staaf en plaatijzer.



De verschillen tussen smeedijzer en gietijzer zijn goed waarneembaar op een breukvlak. Het smeedijzer (boven) laat een vezelachtige structuur, zoals bij hout, zien en het gietijzer (beneden) een kristalstructuur.

Een hoogwaardig product van het hoogovenbedrijf is het hardbare staal, dat met verschillende technieken van opkolen uit speciale soorten frisijsijzer wordt gemaakt. De enige koolstofdrager die in het Europese hoogovenbedrijf tot in de achttiende eeuw wordt gebruikt is houtskool dat vrijwel

uitsluitend uit koolstof bestaat en geen bijmengsels van enige omvang bevat die de technische eigenschappen van het ijzer nadelig kunnen beïnvloeden. De koolstof dient niet alleen als brandstof om de noodzakelijke temperatuur van 1150 tot 1600 graden Celsius te bereiken, maar ook als reactiemiddel om het ijzererts te reduceren. Het probleem van steenkool, of van de veredelde vorm ervan: cokes, is dat het zwavel bevat. Het zwavel verbindt zich ten dele met het ijzer, wat de kwaliteit niet ten goede komt.

Ofschoon de ijzerproductie in Groot-Brittannië een lange traditie kent, is er vóór de achttiende eeuw geen sprake van een voortrekkersrol. De belangrijkste vernieuwingen in de vóór-industriële tijd, zoals de hoogoven, verschillende frismethoden en de draaibank komen van het vasteland van Europa naar Groot-Brittannië. De ijzerproductie van vóór 1700 is nogal star van opzet en reageert traag op vraagontwikkeling. Een productieverhoging in de bestaande smelterijen door uitbreiding van het bedrijf en verlenging van de jaarlijkse productietijd worden door drie factoren beperkt: regionale en seizoenmatige beschikbaarheid van waterkracht, schaarste aan vaklieden en de regionale prijs van hout, resp. houtskool. In de zeventiende eeuw stijgt de prijs van houtskool, door stijgende houtprijzen, maar ook vanwege stijgende loonkosten van houtkappers, kolenbranders en voerlieden. Omstreeks 1750 produceert Engeland 25.000 ton ruwijzer per jaar. Ter vergelijking de ijzerindustrie in Stiermarken (Oostenrijk) produceert tweemaal zoveel.

De Britse ijzerindustrie kan in de achttiende eeuw niet voldoende ijzer produceren, om aan de stijgende vraag naar producten van ijzer voor landbouw, mijnbouw en scheepsbouw te voldoen. Ook de kwaliteit van het Britse ijzer laat te wensen over wat de Britse marine doet besluiten, haar schepen niet uit te rusten met uit Engels ijzer gemaakte ankers, ankerkettingen en mastringen. Groot-Brittannië is aangewezen op import van ijzer, vooral uit Zweden en in mindere mate uit Rusland. Engeland is in de tweede helft van de achttiende eeuw de grootste ijzerimporteur in de wereld. De invoer bereikt haar hoogtepunt in 1793 met 59.000 ton en tot het jaar 1775 importeert het land meer ijzer dan dat het zelf produceert. Weliswaar heeft Groot-Brittannië ijzererts en steenkool in overvloed, maar deze voorraden kunnen nog niet worden benut, aangezien de problemen van het smelten met steenkool en het omzetten van ruwijzer in smeedijzer nog niet zijn opgelost.¹⁹ De technische vernieuwingen vangen begin achttiende eeuw aan, maar het zal nog tot het einde van de eeuw duren alvorens de cokeshoogoven gemeengoed wordt en de techniek van het frissen met steenkool de plaats inneemt van het oude haardfrissen met houtskool. Gelijktijdig met de omwenteling van houtskool naar steenkool stijgt vanaf 1750 voortdurend de productie van ruwijzer. In 1775 bereikt het 44.000 ton. In 1790 is dat reeds verdubbeld. De grote sprong in de Britse ijzerproductie vindt na 1790 plaats door de verspreiding van de methode om smeedijzer te maken met behulp van steenkool. In 1805 is de productie van ruwijzer ca. 250.000 ton. Daarmee verzorgt Groot-Brittannië ongeveer één derde van de

¹⁹ Akos Paulinyi, 'Die Umwälzung der Technik in der Industriellen Revolution ...' p. 383-6

Europese productie van ruwijzer. De voormalige grootimporteur is binnen 25 jaar de grootste producent en exporteur ter wereld geworden en behoudt deze positie bij een voortdurende groei tot het laatste trimester van de negentiende eeuw.

Ontwikkeling van het aantal cokeshoogovens in Groot-Brittannië 1750-1791

Jaar	Totaal hoogovens	houtskool hoogovens	Cokes Hoogovens	% cokeshoogovens van totaal
1750	74	71	3	4
1760	88	64	14	16
1775	74	44	30	40
1780	77	34	43	56
1785	81	28	53	65
1788	86	26	60	70
1791	107	22	85	79

Bron: Ch. K. Hyde, *Technological change and the British iron industry* (Princeton 1977)

In 1849, als de productie twee miljoen ton bedraagt zijn de regio's met het grootste aandeel in de Britse ruwijzer productie: Zuid-Wales, de 'Black Country' met Staffordshire aan kop en Schotland. Deze, maar ook gebieden met een kleinere grondstofvoorraad, zoals Shropshire, hebben naast hun technische voorsprong een door de natuur gegeven kostenbesparend voordeel van dicht bijeen gelegen ijzererts en steenkoolmijnen. Het Britse hoogovenbedrijf kan het ijzer, ondanks het sterk gestegen gebruik vanwege de expanderende machinebouw en de bouw van nieuwe transportwegen en transportmiddelen, leveren tegen prijzen die vervanging van hout door ijzer, voor de constructeur, maar ook voor de ondernemer aantrekkelijk maakt. De economische voorwaarde voor deze productieve groei is de bereidheid tot kapitaalsinvesteringen die in omvang alleen door enige kolenmijnen zijn overtroffen. Voor een complete hoogoven met pudel- en walswerk is reeds in 1800 tachtig tot honderdduizend pond nodig. In de tussen 1815 en 1820 in Wallonië gestichte bedrijven wordt tussen de 250.000 en 300.000 pond geïnvesteerd. Het grote verschil in investeringskosten laat zich verklaren uit de voortschrijdende innovatie: de cokeshoogoven, het hete lucht blazen (het meest ingrijpende middel tot optimalisering van het smeltproces), het frissen met behulp van steenkool (het zogenaamde puddelen) en de overstap naar het walsen als de belangrijkste manier van vervormen van ijzer. Het is opvallend, dat afgezien van het walsen, de technische vernieuwingen tijdens de Industriële Revolutie van het hoogovenbedrijf bedacht zijn door buitenstaanders. Het zijn Abraham Darby, Henry Cort, James Beaumont Neilson en Henry Bessemer die de mijlstenen plaatsen in de geschiedenis van de metallurgie, maar zij stammen noch uit een familie van ijzersmelters, noch zijn ze in de traditie van het hoogovenbedrijf opgegroeid. Achteraf beschouwd lijkt dat in hun voordeel te zijn geweest.

De kennis van de ijzersmelter is ervaringskennis, die gedurende honderden jaren is vergaard en van generatie op generatie is doorgegeven. Chemische formules zijn hun niet bekend, maar ze kunnen aan de hand van kleur en consistentie de in de regio voorkomende ertsen op kwaliteit keuren. Aan de kleur van de vlammen en ook aan de kleur van de slakken zijn ze in staat om de voortgang van het proces in de hoogoven of de frishaard te beoordelen. Zo kunnen zij het proces bijstellen. Bij de eerste hamerslag kunnen zij de kwaliteit van het ijzer vaststellen en uit mislukkingen gevolgtrekkingen maken. Het functioneert zo goed en zo kwaad als dat gaat onder de voorwaarden dat aan de traditionele manier van werken maar niets wordt veranderd. Wat de vader heeft beproefd is voor de zoon goed genoeg. De in het beroep van smelter, frismeester en hamermeester opgegroeide hoogovenlieden staan wantrouwend, ja zelfs afwijzend, tegenover experimenten. Buitenstaanders zijn daarmee niet behept en ondanks alle verschillen in beroepsmatige achtergronden hebben 'uitvinders' één ding gemeen: de lust tot experimenteren.²⁰

²⁰ Akos Paulinyi, 'Die Umwälzung der Technik in der Industriellen Revolution ...' p. 386-8

Alexander Brody's
ijzermolen op de zuidoever
van de Severn, een halve
mijl stroomafwaarts van
Ironbridge, in 1788. De
mensen op de gravure zijn
half zo groot als in
werkelijkheid om de oven
groter te doen lijken.
Gravure van Wilson Lowry,
naar een tekening van
George Robertson.



Tot 1750 is het
smelten met cokes
nog beperkt tot enige
bevriende en
verwante
ondernemers te
Shropshire. Eerst in

1750 wordt in Doulais in Zuid-Wales en 1760 in de Carron-hoogoven te Schotland ook met cokes gesmolten. Spoedig daarna volgt de doorbraak van de cokeshoogoven. De aanvankelijk trage verspreiding en de dan schielijke uitbreiding valt te verklaren uit de productiekosten die in de jaren na 1760 onder die van het smelten met houtskool komen. Cokes heeft andere eigenschappen dan houtskool: het is vaster, bakt dichter aaneen en ontwikkelt meer gas. Met deze eigenschappen moet bij het verder ontwikkelen van de hoogoven, met name de luchtbehandeling en de beheersing van de smeltgang, rekening worden gehouden. De cokeshoogoven heeft een ander profiel nodig en een krachtiger blaaswerk, alleen dan komen de voordelen van het gebruik van cokes tot uiting. De sterk belastbare samengebakken cokeslaag, die de bovenliggende massa van vele lagen erts en kolen kan dragen, maakt het mogelijk om grotere hoogovens te bouwen. Om deze rendabel te laten werken zijn grotere blaaswerken nodig, die een grotere hoeveelheid lucht onder hogere druk leveren. Voor deze blaaswerken is meer aandrijfenergie nodig, minstens een geschikt waterrad of beter een stoommachine. Darby en zijn navolgers moeten aan de hand van de praktijk de problemen oplossen en daar is de nodige tijd mee gemoeid. Vanwege hun kennisvoorsprong in de giettechniek, in het bijzonder met het gieten in zand, slagen ze er toch in met de nog 'slechte' cokeshoogoven uit de kosten te komen. De beslissende economische prikkel om in de jaren zeventig van de achttiende eeuw cokeshoogovens te bouwen is de stijgende binnenlandse vraag naar ijzer. Ten tijde van de omwenteling van houtskool naar cokes zijn er innovaties die de kinderziekten van de cokeshoogoven stap voor stap oplossen. De eerste belangrijke verbetering is de vervanging van de blaasbalg door een blaaswerk werkend met houten plunjerbakken, maar echt toekomstbestendig is het in 1768 uit ijzer gemaakte cilinderblaaswerk van John Smeaton dat hij installeert in de Carron-fabriek te Schotland. Het cilinderblaaswerk, aangedreven met een waterrad of stoommachine, garandeert de benodigde hoeveelheid blaaslucht. Het blazen van lucht door meerdere ingangen zorgt voor een meer gelijkmatig luchtstroom in de hoogoven. Een blaaswerk met een hogere en constantere luchtopbrengst, samen met een betere luchtbeheersing, maakt het mogelijk hoogovens te bouwen met een grotere capaciteit. Daarmee kan de gemiddelde dagproductie van 2 á 3 ton in de periode 1740-1790 opgevoerd worden tot 5 á 7 ton in de periode 1790-1830.

Het specifieke kolenverbruik (kolen per ton ruwijzer) moet in de experimentele tijd zeer hoog zijn geweest. De enige beschikbare gegevens daaromtrent zijn die van de Horsesay hoogoven te Shropshire. In de periode 1755-1806 is er een gemiddeld verbruik van 5,5 tot 6,6 ton cokes voor één ton ruwijzer, terwijl voor het maken van één ton cokes drie ton steenkool nodig is. Daaruit volgt dat er 16,5 tot 19,8 ton steenkool nodig is voor het maken van één ton ruwijzer. In de eerste dertig jaar van de negentiende eeuw vermindert het steenkoolverbruik per ton ruwijzer door verbeteringen aan de

hoogoven en in de cokesfabricage tot zeven ton steenkool, respectievelijk 3 ton cokes. Een in het oog springende vermindering van het steenkoolverbruik wordt in de jaren dertig van de negentiende eeuw bereikt met het blazen van hete lucht. Het is de belangrijkste technische vernieuwing voor de warmtehuishouding in het hoogovenproces in de negentiende eeuw.



Grove cokes. Cokes is het product van droge destillatie (ook thermolyse of pyrolyse genaamd) van steenkolen bij temperaturen tussen de 900 en 1100° C.

Het idee om in de hoogoven warme in plaats van koude lucht te blazen is van James Beaumont Neilson (1792-1865), werkmeester in de gasfabriek van Glasgow. Neilson, die zijn in een gieterij opgedane kennis verdiept met avondcursussen wis-, natuur- en scheikunde, komt op een curieuze manier op de gedachte om met hete lucht te

blazen. Bij de uitbreiding van een hoogovenbedrijf blijft er voor het blaaswerk onvoldoende ruimte over en deze wordt derhalve op een afstand van ca. 800 meter gebouwd. Vanwege de lange leiding ontstaat drukverlies en de om raad gevraagde Neilson adviseert dit te compenseren door middel van verhitting. Hij experimenteert in de smederij van zijn gasfabriek met de toevoer van verwarmde lucht in het smidsvuur. Nadat hij vaststelt dat een zekere hittegraad sneller kan worden bereikt, zelfs met minder kolen, is hij er van overtuigd dat dit ook in het smeltproces in de hoogoven succesvol moet zijn. Uitproberen in een hoogoven stuit echter op bezwaren bij de smelters, aangezien zij uit de praktijk weten, dat bij koud weer in de winter de fabrieksresultaten beter zijn dan in de zomer. Wat de smelters echter aan de kou wijten, wordt in werkelijkheid veroorzaakt door de hoge luchtdruk en de lage luchtvochtigheid. Neilson die in 1828 een patent op zijn idee krijgt, moet meer dan twee jaar wachten aler de eigenaar van de Clyde-hoogoven hem de 'gunst' bewijst zijn ontdekking bij hem uit te proberen. De resultaten doet de smelters al gauw hun vuistregel 'hoe kouder, hoe beter' vergeten. De dagopbrengst is hoger. Het kolenverbruik per ton ruwijzer daalt bij het gebruik van lucht van 150° C van ruim acht ton naar iets meer dan vijf ton. Met een verbeterde luchtverhitter bereikt men in 1835 315° C. Het kolengebruik daalt daardoor tot 2,8 ton, terwijl de opbrengst in een etmaal oploopt van 6 naar 9 ton ruwijzer. Het hete luchtblazen heeft veel voordelen: minder kolenverbruik en derhalve lagere productiekosten en een grotere productie waardoor de kapitaalslasten verminderen. Aan het eind van de jaren dertig van de negentiende eeuw wordt in Groot Brittannië 55% van het ruwijzer geproduceerd in hoogovens met een hete-luchtblaaswerk. Het langst duurt de overstap in Zuid-Wales. Door de aanwezige hoogwaardige grondstoffen en de gunstige vestigingscondities worden al de beste resultaten bereikt. Er is dan ook sprake van 'de wet van de remmende voorsprong'. In 1839 heeft Zuid-Wales tussen de 34 en 40% aandeel in de totale ruwijzerproductie van Groot-Brittannië. Van de 454.000 ton ruwijzer wordt slechts 10% gemaakt in hoogovens met een hete lucht blaaswerk. Het meeste voordeel uit de nieuwe apparatuur trekken de Schotse bedrijven, die hun aandeel in de Britse ruwijzerproductie aanzienlijk weten te vergroten. Neilson kan zijn ontdekking, in tegenstelling tot Crompton, Arkwright of Cort, in baar geld omzetten. Zijn geniale, algemeen toegepaste patent van 1828, waarin hij alleen het principe van luchtverhitting, maar niet de daarbij noodzakelijke apparatuur laat beschermen, brengt hem met een licentietarief van 0,05 pond per ton ruwijzer een vermogen op.

Restanten van 'Bedlam Furnaces' op de noordoever van de Severn. De ijzermolen, in 1750 gebouwd als een van de eerste 'moderne' cokeshoogovens, is in gebruik geweest tot in de negentiende eeuw. In 1776 komt het bedrijf in bezit van Abraham Darby III en het is zeer waarschijnlijk dat het een bijdrage heeft geleverd aan de bouw van de Ironbridge. Later behoort het bedrijf tot de maatschappij waar John Wilkinson eigenaar van is. (foto: Dina)



Een invloedrijke Schotse hoogoveneigenaar,

tracht het patent te omzeilen, maar na een rechterlijke uitspraak in 1853, in een door Neilson aangespannen proces, moeten hij en de aandeelhouders diep in de buidel tasten en 106.000 pond op tafel leggen. Neilson is met de opbrengst van zijn patent tevreden, koopt een landgoed waarop hij zich in 1847 vestigt en laat, na de rechtszaak in 1853, nooit meer wat van zich horen. Neilson is in zijn tijd, hoewel geen beroepswetenschapper, toch een typisch voorbeeld van hoe wetenschappelijke kennis zijn weg naar de praktijk vindt. Zijn werkwijze voldoet aan die van de experimenterende natuurwetenschappers. Zijn laboratorium is het smidsvuur. Hij noteert nauwkeurig zijn waarnemingen en concentreert zich al spoedig op de verschillen die zich bij de toevoer van warme en koude lucht voordoen. Zijn conclusie, dat de verbranding wordt verbeterd met toevoer van warme lucht is dan ook geen toevalstreffer. Verdere studie naar de theoretische onderbouwing van de werking van het (warme) luchtblazen onderneemt Neilson niet. Hij neemt genoeg, zoals de meeste praktijkmensen, met de praktische resultaten.

Een volgende stap in de verbetering in de warmtehuishouding in de hoogoven is het gebruik van het hoogovengas voor de luchtverhitting. Deze manier van werken stamt niet uit het moderne hoogovenbedrijf, maar uit Baden-Württemberg waar de hoogovens nog met houtskool werken. Nadat het in 1831-32 door Von Faber du Faur (1786-1855), een hoogovenbedrijfsleider te Wasseraalzingen, geconstrueerd verhittingsapparaat, met gebruik van hoogovengas, zich in de praktijk heeft bewezen, verspreidt het zich zeer snel over alle regio's waar met houtskool gestookte hoogovens actief zijn. In Groot-Brittannië is in 1833 in Staffordshire een met hoogovengas verwarmde luchtverhitter in gebruik. Navolging krijgt dit vooralsnog niet, aangezien er in alle hoogovenbedrijven niet verhandelbare kleinkolen liggen opgeslagen die de brandstofkosten zo minimaal maken, dat de meeste hoogoveneigenaren afzien van het benutten van het hoogovengas. Eerst nadat Robert Wilhelm Bunsen (1811-1899), beroemd door de door hem bedachte Bunsenbrander, en Lyon Playfair (1819-1898) hun onderzoekingen naar de chemische samenstelling van cokeshoogovengas in 1845 populariseren, nemen geleidelijk aan ook de Britse hoogovenbedrijven deze luchtverhittingsmethode in gebruik. Nieuw geconstrueerde hoogovens, met aanvullende verbetering van het windbeheer, watergekoelde gietvormen en verdere optimalisering van het blaaswerk en de luchtverhitting zorgen voor een grotere productie van ruwijzer bij een gelijktijdige daling van het brandstofverbruik. Zo stijgt rond 1850 de dagproductie van een hoogoven tot 20 á 25 ton, terwijl het kolenverbruik per ton ruwijzer zich stabiliseert tussen de twee en drie ton. In de massaproductie van ruwijzer kunnen de houtskool gestookte hoogovens de cokes gestookte ovens niet meer bijbenen, ook de eerder zo succesvolle ovens in Stiermarken en Karinthië niet, ondanks dat daar al snel de technische vernieuwingen, zoals het cilindrische blaaswerk en het hete-luchtblazen met hoogovengasverhitting, zijn ingevoerd. Op z'n best bereiken de houtskoolhoogovens, zoals in Treiback (Karinthië), een dagproductie van 16 ton. Vanwege de stijgende houtskoolprijzen zijn de productiekosten per ton ruwijzer al spoedig

verdubbeld. Tegen de concurrentie van de cokeshoogovens kunnen de houtskoolhoogovens zich slechts staande houden met behulp van hoge invoerrechten.²¹ Op z'n laatst in 1800 gaan de Britse hoogovens ruwijzer op voorraad produceren, aangezien het zogenaamde tweede smeltproces, het maken van smeedijzer uit ruwijzer, almaar aan belang wint, maar ook de omvang van gietijzeren producten groeit gestaag. Wordt rond 1750 van het Britse ruwijzer productie circa 90% tot smeedijzer verwerkt, in 1788 is dat gedaald tot rond de 60% en moet het verder benodigde smeedijzer worden geïmporteerd. Terzelfder tijd breken technici zich het hoofd over de vraag hoe je met steenkool ruwijzer kan frissen (verlagen van het koolstofpercentage). Voor het frissen is het gebruik van steenkool vanwege de zwavel een probleem, aangezien bij de hoge temperatuur die voor het frissen nodig is, het ijzer te veel door zwavel wordt aangetast. Hoe intensief de Britse hoogovenlieden met het probleem bezig zijn geweest bewijst het feit dat tussen 1761 en 1783 negen hoogovenlieden 8 patenten verwerven met verschillende methoden van frissen met steenkool of cokes. Grofweg volgen ze twee manieren om de aantasting van ijzer door zwavel te voorkomen. In de ene methode wordt de traditionele frishaard vervangen door de, in de koperverwerking en ijzergieterij al langer bekende vlamoven waarin brandhaard en smelthaard van elkaar zijn gescheiden. In de eerste worden de kolen gestookt, in de tweede het ruwijzer gesmolten en gefrist. In de andere methode wordt het te frissen ruwijzer in smeltkroezen geplaatst in een met steenkolen gestookte vlamoven. Voor deze methode staat waarschijnlijk de door Benjamin Huntsman (1704-1776) in 1740 in Sheffield ingevoerde kroezenstaalbereiding model. IJzer wordt in de kroezen ontkoold en omgezet in hoogwaardig hardbaar staal.



Ynysfach Ironworks te Merthyr Tydfil in Wales. Al in 1769 is er op deze plaats een ijzermolen actief. In 1801 worden er twee nieuwe hoogovens gebouwd met een hoogte van 53 voet (ca. 16 m), wat in die tijd zeer aan de maat is en met een door een stoommachine aangedreven blaaswerk. Het bedrijf is in 1874 stilgelegd. Naar een waterverfschilderij van Penry Williams ca. 1825.

De eerste duurzame productie van gefrist ruwijzer wordt bereikt met de kroezenmethode. Na tien jaar van experimenteren laten hoogoveneigenaren in

Staffordshire in 1761, respectievelijk in 1763 en 1773 een in de kern gelijk procedé patenteren waarmee in 1788 ongeveer 50% van het Britse stafijzer wordt gemaakt. De methode staat als 'Potting', Stamping and Potting' of als 'Shropshire Frischmethode' bekend en bestaat uit drie bewerkingsstappen. Allereerst wordt het siliciumrijke cokesruwijzer in een gewone frishaard met steenkool of cokes 'gewit', een procedé, dat ook bij het houtskoolfrissen op het zogenaamde grauwe of grijze ruwijzer werd toegepast. Door het 'witten' wordt het siliciumgehalte beduidend en het koolstofgehalte enigszins verminderd. Vervolgens wordt het 'gewitte' ruwijzer, op verschillende manieren: gieten, granuleren of stampen ('Stamping') verkleind en met toevoeging van slak of kalk, vóór het binden van zwavel en vóór het ontslakken, in de kroezen geplaatst. Tenslotte wordt het ijzer in de gesloten kroezen in een met steenkolen gestookte vlamoven ontzwaveld en ontkoold (gefrist). Aansluitend wordt uit de gebarsten kroezen de klompen gefrist ijzer genomen en tot stafijzer uitgesmeed. Ondanks de hoge arbeidskosten, het grote materiaalverbruik en het brandverlies van rond de 40% (100 kilo ruwijzer levert 56 tot 62 kilo gefrist ijzer op) zijn de productiekosten lager dan die bij het frissen met houtskool vanwege de bescheiden steenkoolprijs.

²¹ Akos Paulinyi, 'Die Umwälzung der Technik in der Industriellen Revolution...' p. 389-97

wroeten in de gloeihitte

Eenvoudiger is het frissen direct in de smelthaard van een vlamoven. Dit wordt toegepast vanaf de jaren zestig van de negentiende eeuw in het centrum van de cokesruwijzerproductie te Shropshire en daarna in Zuid-Wales. De eerste patenten voor dit procedé dateren tussen 1766 en 1783. De door deze patenten geboden bescherming beperkt de verspreiding van de methode. Eerst met het in 1784 gepatenteerde vlamovenfrissen van Henry Cort (1740-1800), later bekend als 'puddelen', komt er een verbreding. Cort is geen hoogovenman, noch iemand die 'in de omgeving van ijzer' is opgegroeid. Hij is scheepsuitruister en neemt in 1775 van een zakenpartner, die zijn verplichtingen niet kan nakomen, de leiding over van een klein hoogovenbedrijf, in Fontley bij Portsmouth, een belangrijke haven en zetel van de marine. Naast de ijzerhandel moet Cort zich nu ook bezighouden met de problemen van de ijzerwinning. In 1789 profiteert hij van de oorlogsomstandigheden en krijgt een grote opdracht van de marine voor het leveren van ijzeren mastbanden. Hij breidt het hamerwerk van zijn bedrijf uit met een walselij. Hij ziet af van het gebruik van het in prijs sterk gestegen Zweedse staafijzer en koopt van de marine tegen een billijke prijs bandschroot, maar wel met het nadeel dat de verwerking tot grondstof hoge arbeidskosten met zich meebrengt. Dit nadeel tracht hij door technische vernieuwingen, die hij in 1783 laat patenteren, op te vangen. Voor het lassen van de schrootpakketten gebruikt hij in plaats van de gebruikelijke haard met blaaswerk een met steenkool gestookte vlamoven zonder blaaswerk en voor het omvormen van de knuppels tot staafijzer, gegroefde, zogenaamde gekalibreerde walsen. Beide vernieuwingen zorgen voor een daling in de productiekosten, omdat zowel het lassen in de vlamoven alsook het omvormen van de knuppels tussen de gekalibreerde walsrollen sneller en met lagere brandstofkosten verloopt. Bovendien is voor de lasoven geen waterrad en blaaswerk nodig.

Een bijzonder sterke puddelaar is William Ball, bijgenaamd 'the Shropshire Giant'. Ball weegt 254 kg. In 1850 leidt hij een processie van 4000 mensen ter viering van de geboortedag van Abraham Darby II. Er is een speciale kraan gemaakt om hem op zijn paard te zetten. Wat het paard er van vindt is niet bekend.

Met het frissen van ruwijzer komt Cort in 1783 voor het eerst in aanraking als hij, wederom door zijn goede contacten met de marine, de gelegenheid krijgt om tegen zeer gunstige voorwaarden schroot te kopen. Het zijn overwegend grote brokken ruwijzer, die in zeegaande schepen bij onvoldoende diepgang als ballast worden gebruikt. Het is aannemelijk dat Cort op de hoogte is van de proeven om ruwijzer in de vlamoven te frissen. Hij lost het probleem op de meest eenvoudige manier op, zonder witten, zonder kroezen en zonder blaaswerk. In de haard van een met steenkolen gestookte vlamoven worden de brokken ruwijzer gesmolten. Voor een voldoende regulering van de temperatuur van het gesmolten ruwijzer wordt dit met slakken bedekt. Een arbeider roert met een ijzeren stang bij voortdurend door de dik vloeibare ijzermassa om deze te ontkolen. Uit de, vanwege het lagere koolstofgehalte stollende frisijzer, worden in de haard enige wolven gevormd en op lashitte uit de haard genomen. De wolven worden onder de hamer gestuikt en aaneengelast. De aaneengelaste wolven worden in de vlamoven opnieuw verhit tot lastemperatuur en tot de gewenste profieldikte en lengte vervormd. Uit Cort's patent van 1784 valt op te maken, dat hij het frissen in de vlamoven en het vervormen met een walswerk als twee stappen in het arbeidsproces 'het effectieve gebruik van vuur



en machine' ziet. Daarmee is de Engelse methode van staafijzerfabricage: frissen en lassen in de vlamoven en walsen tot eindproduct, compleet. De latere naam voor het vlamovenfrissen: puddelen, wat wroeten betekent en niet roeren, stamt uit het spraakgebruik van de hoogovenarbeiders uit Shropshire en werd uiteindelijk het vakjargon voor de methode van Cort. Cort en zijn vaklieden leggen in Shropshire en Zuid-Wales tot 1790 de basis voor het gebruik van de nieuwe methode. Naar zijn voorbeeld worden zes puddel- en walswerken gebouwd. Zijn vaklieden werken als instructeurs bij het aanleren van de belangrijkste kneepjes van het puddelvak. Het directe puddelen van het siliciumrijke cokesruwizer op de met zand beklede bodem veroorzaakt echter problemen en in Zuid-Wales grijpt men ze om die reden terug op het twee-fasen-frisprocedé: het ruwizer wordt eerst in de witoven met cokes gewit en daarna gepuddeld. Later, na 1820, puddelt men op een met slakken bedekte bodem. De basische, ijzeroxiderijke slakken bevorderen het frissen en zorgen er tevens voor dat het grijze gietijzer wordt gewit. Dit zogenaamde 'Pig-Boiling', in het Duits 'Kochfrischen' of 'Schlackenpuddeln' genaamde methode is in Engeland hoofdzakelijk in Staffordshire toegepast. De ontstaansgeschiedenis van het puddelen in het hoogovenbedrijf van Cort doet vermoeden, dat het al eerder is toegepast. Het door de marine verkochte ruwizer is geen cokes, maar houtskoolruwizer waardoor Cort geen last heeft van het in Shropshire en Zuid-Wales optredende probleem van silicium. Dat Cort de bekleding van de haard met zand uit de gieterij overneemt is een aanwijzing, dat hij noch zijn werklieden weten, dat bij het in principe identieke haardfrissen met houtskool een bodembekleding van slakken wordt gebruikt. De zandbodem, alsook een zure bekleding, die bij het frissen van het siliciumrijke cokesruwizer bestaat uit kiezelzure slakken, is de slechtst denkbare combinatie: ze verlengt de duur van het frissen, veroorzaakt een hoge ijzerverbranding en tast de bekleding van de haard aan. Cort heeft het geluk dat zijn ijzer op de marinewerven als gelijkwaardig wordt aangemerkt aan het Zweedse ruwizer. In 1789 houdt zijn geluk op als het bekend wordt, dat zijn financier hem 27.000 pond uit dubieuze bronnen heeft geleend. Om de schuldenlast te ontgaan moet de betalingsonbekwame Cort zijn bankroet aanvaarden. De marineleiding neemt de patentrechten van Cort in beslag. Voor de in de jaren negentig verspreide methode van puddelen ziet Cort geen cent. Het puddelen is gedurende meer dan een eeuw het belangrijkste proces voor het omzetten van ruwizer in smeedijzer. In de jaren twintig van de negentiende eeuw verspreidt het zich over Frankrijk, België en Duitsland met behulp van Britsen later ook Belgische vaklieden.

Friedrich Christian Remy (1789-1861) is de eerste die in Duitsland, in Rasselstein-Neuwied in 1824/5, een puddelwerk opricht, gevolgd in 1826 door Eberhard Hoesch (1790-1861) te Lendersdorf en Friedrich Hartkort (1793-1880), wel de vader van het Roergebied genoemd, in Wetter a.d. Ruhr.



De fabriek van Friedrich Hartkort op Burg Wetter. Naar een schilderij van Alfred Rethel, 1834.

Remy stamt uit een familie, die al enige generaties lang belangen heeft in de ijzerindustrie en de ijzerhandel. Een oom, Heinrich Wilhelm Remy, eigenaar van het Eisenwerk Rasselstein voert in de jaren zeventig van de achttiende eeuw het walsen in Duitsland in. Het handelshuis Hoffmann, waar de familie belangen in heeft, richt zich vooral op Nederland en verzekert het

hoogovenbedrijf van de Remy's te Wenden, de Wendener Hütte, van liquiditeit en afzet.²²

In de jaren dertig van de negentiende eeuw wordt het puddelen ook toegepast in de hoogovenregio's aan de Saar en de Roer. Het puddelen in de vlamoven met steenkool bevrijdt de productie van smeedijzer in Groot-Brittannië van het keurslijf van de houtskool. Het is ontwikkeld om met behulp van steenkool cokesruwizer in smeedijzer om te zetten, maar evengoed of zelfs beter laat houtskoolruwizer zich puddelen en in plaats van steenkool kan bij aanpassing van de vlamoven ook andere brandstof worden gebruikt. Deze ontwikkeling vindt niet plaats in Groot-Brittannië, maar in hoogovenregio's zonder steenkool, het eerst in Zweden en later in de jaren dertig en veertig van de negentiende eeuw ook in Stiermarken, Karinthië en Frankrijk. Voor de aanleg van spoorwegen is veel rails nodig en moet de capaciteit aan puddelovens, gestookt met hout en uit minderwaardige brandstoffen als turf en bruinkool geproduceerd gas, worden uitgebreid. Het stoken met gas, ook uit steenkool, bewijst zich als de effectiefste benutting van brandstof. Een voor de machinebouwer, in het bijzonder die van locomotieven, belangrijke ontwikkeling is de productie van ruwstaal in de puddeloven. Staal puddelen is, na de eerste pogingen in Karinthië en Beieren, in de jaren veertig van de negentiende eeuw in Westfalen, meer in het bijzonder in het Bergische land ontwikkeld en in de praktijk gebracht. De ontwikkeling staat opnieuw op naam van een tweetal niet-hoogovenlieden: de getalenteerde graveerder Gustav Bremme uit Unna en de chemicus Franz Anton Lohage (1815-1872). Vanaf 1849 worden, de tot dan toe met houtskool gestookte haarden, waarin de ruwstaal productie uit Siegen succesvol werd gepuddeld, omgebouwd tot met steenkool gestookte ovens.

Lohage werkt in zijn jonge jaren eerst als landarbeider in de omgeving van Balve en vervolgens als fabrieksarbeider in een chemisch bedrijf in Wocklumern. Voorstellen die hij doet om het werk te vereenvoudigen worden niet alleen van de hand gewezen, maar leiden zelfs tot zijn ontslag. De toenmalige president van Westfalen, Ludwig Freiherr von Vincke, hoort van het voorval en zorgt er voor dat Lohage naar de nijverheidsschool in Hagen gaat. Na afsluiting van zijn schooltijd werkt hij eerst bij chemische bedrijven in Iserlohn en Oraniënburg om vervolgens te studeren aan het nijverheidsinstituut, de latere Technische Hogeschool, te Berlijn. Na beëindiging van zijn studie sticht hij in Dortmund een stearinefabriek. Dankzij de graficus Gustav Bremme uit Unna komt Lohage in aanraking met de staalfabricage. Het door Henry Cort in 1784 uitgevonden en in 1824 door Christian Friedrich Remy voor het eerst in Duitsland uitgevoerde puddelen levert op z'n best week welijzer op. Het maken van hard staal gebeurt min of meer bij toeval. Bremme, die poogt grijsijzer door gloeien om te zetten tot staal, vraagt Lohage om advies. Onder nauwkeurige waarneming en sturing van het gloeiproces lukt het Bremme en Lohage om staal in de puddeloven te fabriceren. Gezamenlijk met Gustav Lehrkind uit Haspe sticht het tweetal in 1849 de vennootschap Lohage, Bremme & Co. en passen het proces met goede resultaten toe, in het puddelwerk van Lehrkind, Falkenroth & Co. in Haspe. Kinderziekten worden door ingenieur H. Fehland verholpen. Het gelukt hem ook om het procedé en breder ingevoerd te krijgen, vooral buiten Duitsland. De Pruisische staat, zijn restrictieve patentpolitiek getrouw, wijst de patentaanvraag van Bremme en Lohage af, maar ze verkrijgen al spoedig patenten in het buitenland. In Engeland is de door zijn kwaliteitsproducten beroemde fabriek van Low Moors te Leeds de eerste die het staalpuddelen toepast.²³ Lohage is nu een veel gezocht specialist die veel om hulp wordt gevraagd, vooral bij noodlijdende bedrijven om verbeteringen aan te brengen in de productie van ruwizer en in de staalfabricage. Alexander von Humboldt laat zich 1854 lovend uit over Lohage vanwege zijn: "scharfsinnigen Betrachtungen" op het gebied van de ijzer-koolstof-verbindingen in de verschillende ijzersoorten. Tot welstand en aanzien gekomen probeert Lohage zonder resultaat een nieuwe staalzuiveringsproces te ontwikkelen, maar verliest daarmee zijn hele vermogen dat hij met zijn puddelstaal vinding verdienden.

In een verloop van ongeveer vijftig jaar groeit de productie van ruwizer almaar en wordt de vraag naar frisijzer almaar groter, waardoor het puddelproces meer en meer een bottleneck wordt. Het puddelen is vanwege zijn handmatige methode noodwendig kleinschalig. De puddelaar heeft nu eenmaal zijn menselijke fysieke beperking en met 200 a 250 kg per charge is de grens al meer dan bereikt. Het beroep van puddelaar behoort tot de lichamelijk zwaarste en na vijftien tot twintig jaar is hij volkomen op.

²² K. Kaufmann, *Chronik der Wendener Hütte* (Olpe 1995³) p. 30-31

²³ Akos Paulinyi, 'Die Umwälzung der Technik in der Industriellen Revolution ...' p. 397-402

Het ruim dertig ton wegende vliegwiel van de walsen van de voormalige Low Moors Steel Works, de eens zo vermaarde fabriek van kwaliteitsstaal, is nu nog slechts een monument. Het bedrijf is het eerste in Engeland die het procedé van Lohage en Bremme voor staalpuddelen toepast. (foto: Baronas)



In de periode tussen 1800 en 1830 wordt door verbetering aan het proces de opbrengst per oven per 24 uur wel opgevoerd, maar met een maximum van drie ton is de absolute bovengrens wel bereikt. De enige manier om een hogere productie te bereiken is het

plaatsen van meer ovens. In 1810 zijn ertussen de 150 en 200 puddelovens in gebruik. Circa 1830 zijn dat ertussen de 1.500 en 2.000. Het maximum aantal ovens wordt bereikt in 1873 als er bij de 287 hoogovenbedrijven in Groot-Brittannië 7.264 puddelovens staal produceren.²⁴ Het probleem van de productiebeperking door het puddelproces wordt eerst opgelost nadat Henry Bessemer in 1856 een methode ontwikkelt van blazen met zuurstof in de naar hem genoemde Bessemerpeer.

rollen is beter dan slaan

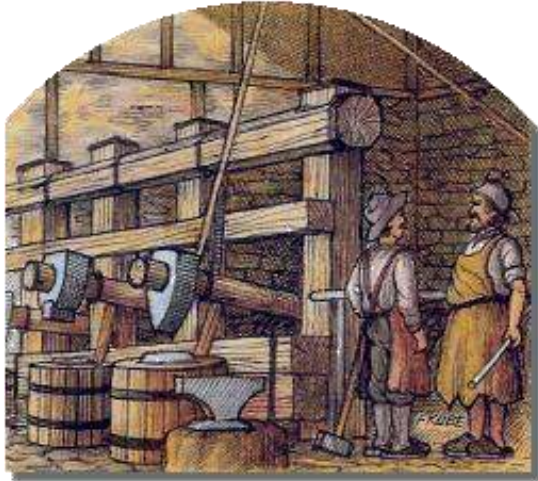
Het met waterkracht aangedreven hamerwerk, een middeleeuwse vinding, blijft vrijwel onveranderd in gebruik tot in het midden van de negentiende eeuw. Waar lichaamskracht te kort schiet biedt het hamerwerk uitkomst, zoals bij het smeden van grote en zware ijzeren producten als scheepsankers en voor halffabrikaten als de uit wolven gewonnen blokken ruwijzer. De halffabrikaten worden verwerkt tot staven, knuppels en plaat, maar soms ook tot eindproducten als zeisen. De bewerking van het halffabrikaat gebeurt zowel in de ijzermolens zelf als bij de stedelijke smederijen. In de late middeleeuwen ontwikkelen zich drie typen hamers - staart-, opwerp- en voorhamer - waarbij de naam wijst op de plaats van het aangrijpingspunt van de nokkenas op de hamer. Zo worden de snelle staarhamers, met hun harde slag, overwegend bij het smeden van zware stukken gebruikt. De lichtere opwerp en voorhamers worden gebruikt in de ijzerwinning voor het uitsmeden van de wolven. Zoals ook in de andere ambachten het geval is ontwikkelt zich aan de vooravond van de Industriële Revolutie bij de hamersmeden het assortiment aan gereedschappen en beschikken deze smeden over een uitgebreide collectie aan hamerkoppen, die ze kunnen inzetten al naar gelang de aard van het smeedwerk. Het is niet vast te stellen waar en wanneer de ene, dan wel de andere hamervorm voor het eerst is gebruikt en door wie die is bedacht.

Dit soort innovaties is maar zelden in documenten vastgelegd. Is dat wel het geval, dan nog is de hamervorm in de technische literatuur van de zestiende en zeventiende eeuw door tekentechnisch onvermogen niet of nauwelijks te herkennen. Geheel anders is dat met de nauwkeurige afbeeldingen in de encyclopedie van Diderot & d'Alembert, wat aannemelijk maakt, dat een groot deel van de verbeteringen eerst plaatsvindt in de zeventiende en achttiende eeuw.²⁵

²⁴ Akos Paulinyi, 'Die Umwälzung der Technik in der Industriellen Revolution ...' p. 405-406

²⁵ Ulrich Troitzsch, 'Technische Wandel in Staat und Gesellschaft ...' p. 187-188

Een hamerwerk is in strikte zin geen arbeidsmachine. Vorm en kwaliteit van het eindproduct is afhankelijk van de vaardigheid van de smid, die het werkstuk onder de regelmatig vallende hamer manipuleert. Regelmatig moet hij het ijzer in het smidsvuur weer op gloeihitte brengen. Hoe verbazingwekkend nauwkeurig de smeden in de zeventiende en achttiende eeuw hun handwerk beheersen is te zien bij de bloeiende zeisenfabrieken in Stiermarken en het Bergische land. De zeisen worden geheel onder de hamer uit één stuk staal, of ijzer met ingelast staal, maaigereed gesmeed. Hetzelfde kan gezegd worden voor het kunstige drijven uit koper- en messingplaat van ketels, pannen en schalen of ketelpauken met lange smalle staken met afgeronde koppen.



De 'Frohnauer Hammer' dateert uit de vijftiende eeuw, maar heeft in de huidige toestand gewerkt van de zeventiende tot de negentiende eeuw. Het is een van de weinige volledig bewaard gebleven hamerwerken in het Ertsgebergte in de Duitse deelstaat Saksen. De drie staarhamers hebben een gewicht van resp. 100, 200 en 300 kg. Het hamerwerk is nu een museum in eigendom van de gemeente Annaberg-Buchholz.

Het werken in een hamerwerk zorgt ervoor, door het lawaai die de beer (hamerkop) bij het vallen veroorzaakt, dat de smeden na enige tijd zware gehoorschade oplopen en meestal zelfs volledig doof worden. Een andere manier om metaal te vervormen is door walsen. Om ijzer te walsen is een stabiel

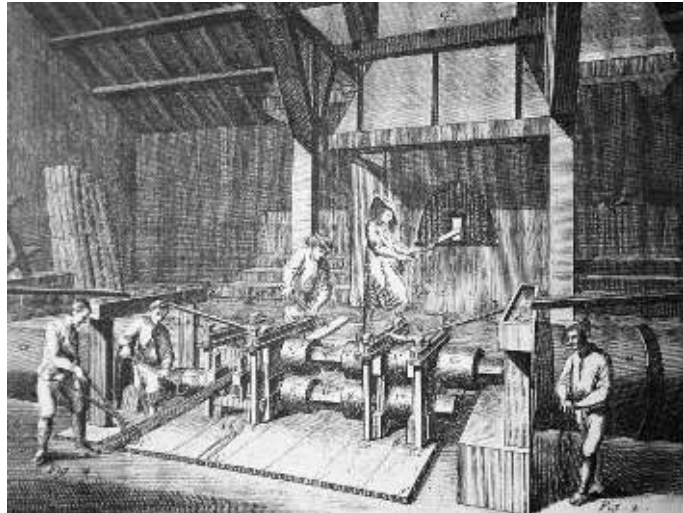
walswerk met walsrollen met een hard oppervlak nodig, terwijl ook veel energie is vereist. Het ligt voor de hand dat het walsen eerst is toegepast op non-ferro metalen. Al door Leonardo da Vinci zijn eenvoudige walswerken ontworpen voor het walsen van goud en zilver tot folie, alsook een – naar de toenmalige stand van de techniek onuitvoerbaar – wals- en trekmaschine voor het walsen van conische ijzeren staven voor het maken van kanonnen. De aandrijving van de machine bestond uit een turbinerad en een wormwiel. Uit de zestiende eeuw zijn ook schetsen van kleine handgedreven walswerken bekend, voor het walsen van loden vensterglaszettingen in H-profiel. Berichten uit die tijd vermelden ook kleine, met waterkracht aangedreven gegraveerde walsrollen waartussen dunne edelmetalen platen worden gewalst. Salomon de Caus (1576-1626) vermeldt in zijn boek *Von Gewaltamen bewegungen* vermeldt bij een handgedreven walswerk voor het maken van tin en loodplaat voor orgelpijpen het jaar 1615. De bovenste walsrol is met twee schroefspillen te verstellen.²⁶

Het is 1670 als Thomas Hale in de buurt van Deptford het eerste walswerk voor het walsen van loodplaten opricht. Het in de oven gesmolten lood, nogmaals van bijmengsels ontdaan, vloeit, na opening van de smelthaard, door een goot in een horizontale, ondiepe, kantelbare trog. De inhoud van de trog stemt overeen met de gewenste omvang van de loodplaat. De trog wordt door werklieden met behulp van twee met kettingen verbonden hefbomen gelost op de giettafel waar de gietmeester met een spaan het vloeibare lood gelijkmatig verdeelt. Na afkoeling grijpen de haken van een zwaakraan in een gat in de loodplaat. Het gat is uitgespaard door een bout op de giettafel. Met behulp van de kraan wordt de loodplaat op een stapel gelegd. Met dezelfde kraan kunnen de platen op het in het verlengde van de giettafel opgestelde walswerk worden gelegd, die met een rosmolen wordt aangedreven. Voor en achter de wals staan roltafels opgesteld waarmee de walser, met behulp van een hevel, de platen heen en weer door de wals kan bewegen. De walsrollen kunnen door een transmissie in een omgekeerde draairichting worden gebracht. De walsrollen zijn qua onderlinge afstand handmatig te verstellen. De loodplaten worden meerdere malen door de wals gevoerd om op de gewenste dikte te worden gebracht. Eenmaal op de gewenste dikte worden de platen opgerold en met de kraan terzijde gelegd. Voor het gehele proces zijn zes, met de paardenknecht mee zeven,

²⁶ Ulrich Troitzsch, 'Technische Wandel in Staat und Gesellschaft ...' p. 188-189

werklieden nodig. Oven, giettafel, kraan en walswerk zijn, om onnodig transport van loodplaten te voorkomen, achter elkaar opgesteld. Een rationele werkwijze die eerder in de negentiende eeuw verwacht zou worden. Bij de bewondering voor deze efficiënte vóór-industriële bedrijfsorganisatie mag niet vergeten worden dat het bij het walsen van lood gaat om licht vervormbaar metaal, dat koud kan worden gewalst.

Wals en snijwerk voor bandijzer. Gravure uit de in 1775 in Parijs uitgegeven encyclopedie van Diderot en d' Alembert



Het stugge koper- en messingplaat moet tussen de walsgangen door telkens weer in de oven op gloeitemperatuur worden gebracht. De koper en messingplaten zijn beduidend kleiner dan de loodplaten aangezien de benodigde energie om ze door de wals te voeren ontbreekt. Ondanks het energieprobleem wordt in het laatste trimester van de zestiende eeuw ook op het zwaar te bewerken smeedijzer het walsprincipe toegepast. Heeft men tot die tijd staafijzer met de hamer gestrekt en verbreed om daarna het gloeiende ijzer, met de onder de hamer gehouden schrotbeitel, te splijten, nu wordt in de omgeving van Neurenberg voor het eerst een met waterkracht aangedreven snijwerk, of misschien zelfs een combinatie van snij en walswerk toegepast. De knuppel wordt eerst tot een vlakke band gewalst en daarna, met behulp van op een as bevestigde conisch toelopende ijzeren schijven, tot strippen te worden gesneden.²⁷ Een bericht uit de achttiende eeuw over de Neurenberger werktuigkundige Hans Lobsinger (†1570) meldt:

“Er war auch letztens in Darstellung eines und des andern künstlichen und besonderen Preß-Werckes gar glücklich, indem er unter anderen einige in Form einer Mühle machte, darinnen man das Eisen ohne Hammer zainen und strecken, dick und dünn als gesägte Blätter, richten kundte.”

Lobsinger heeft zo'n honderd uitvindingen op zijn naam staan waaronder een rosmolen voor diamantslijpen. In 1550 bedenkt en maakt hij, in plaats van de gebruikelijke leren blaasbalgen, houten kuipen met een plunjer voor het blazen van lucht in ovens.



De betekenis van Christopher Polhem voor de Zweedse economie kan nauwelijks sterker worden verbeeld dan met zijn beeltenis op het Zweedse bankbiljet van 500 kronen. Op de andere zijde staat koning Karel XI.

De wals- en snijwerken zijn technisch nog hoogst onvolmaakt, zodat de gewalste en gesneden stukken grof uitvallen, wat echter in die tijd voor het beoogde doel toereikend is. De walswerken worden al spoedig ook in andere ijzerverwerkende regio's in Europa toegepast. In Engeland nog voor het einde van de zestiende eeuw. Successievelijk aangebrachte verbeteringen zorgen geleidelijk aan voor een stijging van de productiviteit. In de achttiende eeuw worden walswerken geconstrueerd, waar reeds vóórgewalst ijzer door qua maat afnemende profielwalsen wordt gevoerd. Voor het maken van smalle koperen of messing plaatstrippen om er draad van te kunnen trekken worden grote rechtopstaande

²⁷ Ulrich Troitzsch, 'Technische Wandel in Staat und Gesellschaft ...' p. 189-190

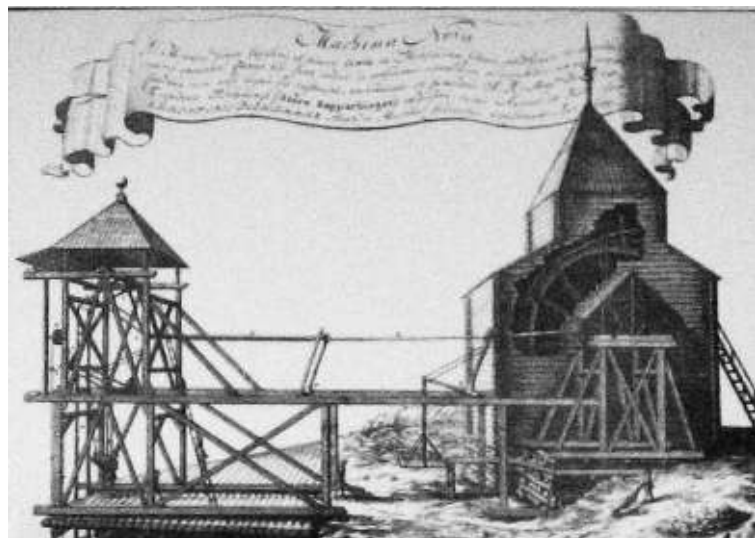
ijzeren scharen gebruikt. Het beweegbare been wordt door een houten hevelmechanisme met de hand of met behulp van een waterrad bewogen. Bij een door een as aangedreven schaar springt het bewegende been van de schaar na het knippen door een contragewicht weer terug in de uitgangspositie. Tegen het einde van de zeventiende eeuw is men in staat rails van 20 tot 30 cm met een breedte van 7 tot 10 cm en een dikte van 1,5 tot 2,5 cm uit staven met een lengte van 2 tot 3 meter te walsen, om ze daarna tot kortere staven te snijden. Veertig jaar later kan rails worden gewalst met een lengte van 60 cm bij een doorsnede van 10x5 cm. Ter vergelijking: plaat kan zonder hulpkrachten worden uitgesmeed tot een grootte van 60x60, terwijl in het derde trimester van de zestiende eeuw walswerk blad kan uitwalsen van 50x100 cm. De maat en het gewicht van het werkstuk wordt begrensd door het nog weinig stabiele walswerk en de energie die het waterrad of rosmolen kan opbrengen. De arbeidsbesparing die met walsen ten opzichte van het smeden kan worden bereikt, afgezien van een gladder oppervlak en een gelijkmatigere dikte, wegen tegen de nadelen van de nieuwe techniek op.

De gecombineerde snij- en walswerken vereisen aanzienlijke investeringen en de verspreiding verloopt dan ook maar langzaam. Vooral nog slagen de nieuwe inrichtingen er niet in de hamerwerken te verdringen. Grote stukken plaatijzer, nodig voor de grote ziedpannen in de zoutziederijen (salinen) en ook koperplaten worden nog steeds onder de hamer gemaakt. In een technische beschrijving uit de tweede helft van de achttiende eeuw staat dat voor het uitsmeden van platen met een gewicht van 150 tot 200 kg 2 tot 4 personen nodig zijn. De plaat, die na het uitsmeden ca. 2,70 m in het vierkant is, moet door de smid en zijn helpers tijdens het smeden met tangen worden beheerst.²⁸

Het is vooral Christopher Polhem (1661-1751), een Zweeds werktuigbouwkundige, die de walstechniek ingrijpend verbetert. Zijn innovaties maken van Zweden de grootste staalproducent van Europa. Hij staat bekend als de 'vader van de Zweedse werktuigbouwkunde'. Polhem gaat in 1687 aan de Universiteit van Uppsala wis- en natuurkunde studeren, met een nadruk op mechanica. Doordat hij geen Latijn kent, de wetenschappelijke voertaal van die tijd in Europa, zal zijn werk niet buiten Zweden worden gepubliceerd. Direct na zijn studie krijgt Polhem de opdracht om de middel-eeuwse astronomische klok van de kathedraal van Uppsala, rond 1500 gebouwd door Petrus Astronomus, die al een eeuw stilstaat, te repareren. Hij voert deze taak met succes uit en valt daardoor op bij Karel XI van Zweden, die hem opdraagt zijn aandacht te richten op de Zweedse mijnbouw. De directe aanleiding tot deze opdracht is het instorten van de mijn bij Falun, een voorval dat de onveiligheid en inefficiëntie van de Zweedse mijnbouw nogmaals manifest maakt. Zweden is rijk aan ijzererts die bovendien goed bereikbaar is. In de tijd van Polhem wordt ijzererts gewonnen met de brandmethode, het aansteken van vuren tegen de rotswand, zodat deze slijt door de hitte.

Een Polhem-waterwiel gebouwd in 1693. De lattenoverbrenging tussen het waterrad en de pomp is goed te zien, evenals de afstand die de overbrenging kan overbruggen.

De mijnen, die veelal in de omgeving van een van de vele Zweedse meren liggen, hebben veel last van grondwater. De mijnen lopen zo snel vol dat ruim een derde van de mijnwerkers constant bezig is met hozen. Na delving wordt het erts in karren naar de hoogoven geduwd, die ondanks de goede kwaliteit van het erts slecht ruwijzer levert.



²⁸ Ulrich Troitzsch, 'Technische Wandel in Staat und Gesellschaft ...' p. 190-191

Polhem start, ter uitvoering van zijn opdracht, met een reis door Europa om de methoden van mijnbouw te bestuderen en bekende natuurkundigen te spreken, onder wie Leibniz, die diepe indruk op hem maakt. Terug in Zweden besluit Polhem waterkracht te gebruiken om de mijnen droog te houden. Daarvoor maakt hij gebruik van het waterrad, dat hij echter uitbreidt met een overbrenging en een methode om de energie van het water over grote afstanden te transporteren. De Polhem-raderen, die verrijzen door heel Zweden, hebben als bijzonderheid aan weerszijden van het rad een lat die andere latten in beweging brengt, als waren het de 'benen aan de trappers van de fiets', waardoor het mogelijk is pompen op een grote afstand aan te drijven. De raderen drijven eerst en vooral waterpompen aan om de mijnen droog te houden. De uitgespaarde arbeidscapaciteit kan nu ingezet worden voor het delven van de erts, wat de productiviteit aanzienlijk verbetert. Er staan bellen op de raderen, die de mijnwerkers waarschuwen als de pompen stilvallen. De raderen brengen ook transportbanden in beweging die het erts vervoeren naar de hoogoven. Voor zijn verdiensten wordt Polhem in 1716 geridderd en een levenslang staatspensioen toegekend. Polhem richt zich nu op de eigenlijke productie van staal. Met steun van de opvolger van Karel XI, Karel XII, zet hij een staalindustrie op in Stjärnsund. De hoogovens worden uitgerust met mechanisch aangedreven blaasbalgen. Polhem bouwt eerst een mechanisch aangedreven hamerwerk en later een mechanisch aangedreven walswerk. Het Polhem-rad krijgt ook een militaire toepassing. Een droogdok van de marine kan met behulp van een rad leeggepompt worden. Polhems vindingen zorgen ervoor dat Zweden een Europese grootmacht wordt en zijn bedrijven produceren al snel het beste staal van Europa. Hij slaagt erin om Zweden als het ware in één klap midden in het tijdperk van de Industriële Revolutie te plaatsen. In 1731 wordt zijn bedrijf grotendeels verwoest door brand, alleen de klokkengieterij blijft gespaard. Polhem laat zijn land een onderzoeksinstituut na, een voorloper van de latere mechanische laboratoria. Het instituut doet onderzoek naar mechanische toepassingen voor de industrie. Het is uitgerust met modellen van werktuigen, tabellen voor raderen en krachtoverbrengingen en alle andere vindingen die voortvloeien uit Polhems werk. Kort na 1700 beveelt Polhem aan om rails te maken in profielwalsen. Enkele tientallen jaren later zal dat in Engeland in de praktijk worden gebracht. Polhem bouwt in Zweden walswerken waarop ijzeren staven kunnen worden uitgewalst met een rond of vierkant profiel voor het smeden van vijlen, sleutels, messen of degenklingen. Voor de walswerken gebruikt hij, naast gegoten en aan het oppervlak geharde walsrollen, zoals ze in Engeland al langer in gebruik zijn, gesmede walsrollen, die met een beitel in een verschuifbaar support op maat en glad worden gedraaid, om vervolgens te worden gehard en geslepen. Het stabiele walswerk functioneert als draaibank. Ook op schroefdraadproducten pakt de ontwikkeling van de snij- en walswerken voordelig uit.

De lattenoverbrenging van een Polhem-waterwiel in Bad Kosen in Duitsland (Thüringen). In 1730 stoten mijnwerkers op een zoutbron. Met behulp van een waterwiel en een lattenoverbrenging van enige honderden meters wordt een plunjerpomp aangedreven die het zoute water oppompt. In het naastgelegen gradeerwerk, waar het zoute water over esdoortakken wordt geleid, wordt het zoutgehalte verhoogd. Het zout wordt daarna gewonnen in de ziederij. Het Polhem-waterwiel en lattenwerk werkt na meer dan 250 jaar nog steeds. (foto: Baronas)



Al in het begin van de vijftiende eeuw gebeurt het trekken van grof en middelfijn draad in Neurenberg halfautomatisch, een techniek die zich in de volgende eeuwen verspreidt over alle Europese centra van draadtrekkerij. Na iedere, met een waterrad aangedreven, trekbeweging moet de op de schommel

zittende draadtrekker alleen nog de tang openen en opnieuw vastklemmen op het draadeind. In 1530 wordt het draadtrekken, het eerst in Neurenberg, geheel automatisch, nadat een mechanisme van een zichzelf openende, toegrijpende en weer sluitende tang is ontwikkeld. De techniek voor het trekken van grove draad wordt tot in het midden van de negentiende eeuw zonder wezenlijke verandering toegepast, ondanks dat de 'tangbeet' steeds meer als een hinderlijk kwaliteitsverlies wordt beschouwd. Daarna komt de sleeptangtrekbank in zwang, die in één trekgang een veel langere grove draad kan trekken. Al in het midden van de achttiende eeuw zijn er in Zweden ideeën om grof draad te maken op gekalibreerde walswerken. Het eerste patent voor een gekalibreerde wals wordt in 1766 in Engeland verleend. Hoewel Cort het walsen in zijn eerste patent van 1784 betreft is het dus noch nieuw, noch door hem ontdekt. Voor het vervormen van smeedijzer zijn in Duitsland en Frankrijk al eerder walsen gebruikt. In snijwerken heeft men vooreerst staafijzer met gladde walsrollen tot band gewalst en met snijwalsen in stroken gesneden hoofdzakelijk voor de productie van nagels. De tweede aanwending van walsen, het walsen van plaat, treffen we sedert de zeventiende eeuw aan in Saksen en sinds de jaren twintig van de achttiende eeuw in Engeland.

Vanaf de achttiende eeuw wordt de wals gebruikt voor het vervormen van smeedijzer tot staafijzer, met ander woorden voor het maken van profielen met een ronde of vierkante doorsnede. Deze kaliberwalsen, of zoals ze oorspronkelijk werden genoemd 'walsen met toepasselijke sleuven en groeven' zijn vóór Cort al twee keer gepatenteerd. Het proces van vervanging van smeedhamers door walsen komt eerst goed op gang met de verbreiding van het puddelen. De vaak miskende cruciale betekenis van het walsen is gelegen in het feit dat het in tegenstelling tot het smeden een machinale techniek is. In beide gevallen gaat het om vervorming onder druk, echter bij het smeden ligt het resultaat in handen van de smid, die het werkstuk op het aambeeld houdt en stuurt, omdat het hamerwerk niets anders kan dan regelmatig het gewicht van de hamerkop op dezelfde plaats te laten neerkomen. Bij het walsen daarentegen wordt de tevoren bepaalde eindvorm van het werkstuk, uit een knuppel of rechthoekig blok ijzer, zonder directe invloed van mensen bereikt. De opgave van de walser is om te zorgen dat bij iedere walsgang het werkstuk goed in het walswerk wordt ingevoerd. De mate van vervorming, de mogelijke vorm en de mate van nauwkeurigheid waarmee wordt gewalst wordt niet bepaald door de vaardigheden van de walser, maar door de instellingen en het foutvrije functioneren van het walswerk. Omdat zulke walswerken uit ijzer en staal moeten worden gemaakt, is hun verdere ontwikkeling afhankelijk van de techniek van het gieten van walsrollen, steunen en aandrijfelementen en de technische mogelijkheden van de verspanende bewerking, met name die van het afdraaien van de vele onderdelen.

Met de constructie van de walswerken begint de geschiedenis van de zware machinebouw in het hoogovenbedrijf. Aangezien er bij de aanvang van de Industriële Revolutie geen machinebouwfabrieken bestaan, moeten de hoogovenbedrijven zelf hun walswerken ontwerpen en bouwen. Het bouwen van een walswerk zonder een mechanische werkplaats, met een draaijerij voor onderhoud en aanpassing van de productie apparatuur, is onmogelijk. Het maken van het belangrijkste onderdeel van een walswerk: de walsrollen, stelt de ijzergieterij voor een nieuwe opgave, die van het hardgieten of geschaald gieten. Bij dit gietproces blijft de buitenste laag, de randzone van de walsrol, wit en hard en dus slijtvast. De kern van de walsrol daarentegen is grijs en weker en daarmee elastischer. Hardgegoten walsrollen gebruikt men hoofdzakelijk voor gladde walsen, die het product een glad afgewerkt oppervlak geven. Het gieten van walsrollen is natuurlijk ook van de kwaliteit van het ruwijzer en van de nauwkeurigheid van de gietvormen of coquilles afhankelijk, die door de gieterij als bedrijfsgeheim worden bewaard. Meerdere gieterijen, in het bijzonder te Staffordshire en Sheffield, ontwikkelen zich tot walserijen die ook de Midden-Europese markt belevren. In Duitsland wordt eerst in de jaren veertig van de negentiende eeuw walsrollen gegoten van een voldoende kwaliteit. Tot de eerste exporteurs van hardgegoten walsrollen behoren de gieterijen in Heilbronn en Hammerau. De in de jaren negentig opgerichte walswerken, hoe onhandig en lomp deze ook nog zijn, verhogen de dagproductie met 8 tot 15 ton. Een veelvoud van een hamerwerk, dat op een dagproductie van een ton wordt geschat. De walswerken functioneren op waterkracht. In 1792 wordt voor het eerst door John Wilkinson een stoommachine als aandrijving voor een walswerk toegepast. Prestatiegerichte krachtwerktuigen, nieuwe oplossingen voor de krachtoverbrenging en de

aandrijfonderdelen, beter materiaal als het hardgegoten ijzer en verbeteringen in de verspanende bewerking, al deze ontwikkelingen maken het mogelijk dat steeds grotere walswerken worden gebouwd met hogere doorvoersnelheden.



Een moderne plaatwalserij gebouwd door Novokramatorsky Mashinostroitelny Zavod (NKMZ) te Kramatorsk, Oekraïne. De NKMZ behoort tot 's-werelds meest vooraanstaande zwaremachinebouwers en heeft in haar 75-jarig bestaan meer dan honderd walserijen afgeleverd, merendeels binnen de communistische wereld, maar de laatste twintig jaar, na het optrekken van het ijzeren gordijn ook daarbuiten. Deze plaatwalserij heeft een capaciteit van vijf miljoen ton per jaar en walst plaat met een breedte van 2,5 m.

Wereld ijzerertsverbruik 1800-1900

Jaar	Hoeveelheid erts in tonnen	Groei t.o.v. voorgaande notering	Index 1800 = 100
1800	2.000.000		
1850	11.000.000	550 %	550
1870	30.000.000	272 %	1500
1900	92.000.000	306 %	4600

Bron: C.F. van Dam, *Ijzer en staal* (Hoorn 1948)

Naast de invoering van zogenaamde triowalswerken, waarmee dunner kan worden gewalst en waarmee het bij het duowalswerk herhaald opnieuw invoeren van het werkstuk vervalst, verbetert de methode om het walskaliber te berekenen en ook de mogelijkheid die te maken. Zeer belangrijk voor de aanleg van spoorwegen is het patent dat in 1820 wordt verleend voor het walsen van spoorrails. De gepatenteerde walsmethode maakt het mogelijk rails te maken als massa-artikel. In hetzelfde jaar lukt het ook om het voor de bouw zo belangrijke hoekijzer te walsen. Alles bijeen groeit de

dagproductie van een walswerk, in de jaren vijftig van de negentiende eeuw, van 40 tot 60 ton, een hoeveelheid waarvoor 20 tot 30 puddelovens nodig zijn.²⁹

Wereldijzerproductie in de negentiende eeuw

Jaar	Productie in tonnen	Groei van de productie
1820	1.000.000	
1830	1.800.000	800.000 / 80%
1840	2.700.000	900.000 / 50%
1850	4.700.000	2.000.000 / 74%
1860	7.220.000	2.520.000 / 53%
1870	11.840.000	4.620.000 / 64%
1880	18.160.000	6.320.000 / 53%
1890	26.750.000	8.590.000 / 47%
1900	39.810.000	13.060.000 / 48%

De grote toename van de productie vanaf de jaren zeventig wordt veroorzaakt door de verbeterde methode van staalproductie (bessemerproces). Tot 1890 is de Britse ijzerproductie de grootste van de wereld. Vanaf dat jaar neemt de VS die rol over.

©Dik Nas (Sumar 2022)

²⁹ Akos Paulinyi, 'Die Umwälzung der Technik in der Industriellen Revolution ...' p. 402-5