



Vetenskapsrådet



**FORSKNINGENS FRAMTID!**

**ÄMNESÖVERSIKT 2014  
NATURVETENSKAP  
OCH TEKNIKVETENSKAP**

## FORSKNINGENS FRAMTID!

Under 2014 tog Vetenskapsrådet med hjälp av aktiva forskare fram en rad översikter. Tillsammans med ett antal strukturella analyser utgör dessa översikter grunden för styrelsens sammanfattande slutsatser och rekommendationer om forskningspolitiska vägval för att främja svensk forskning under de kommande 5-10 åren. Arbetet går under benämningen Forskningens framtid. Resultatet sammanfattas i en slutrapport sommaren 2015. Sammantaget utgör materialet basen i det underlag som Vetenskapsrådet tar fram inför regeringens kommande forskningsproposition 2016.

Översikterna rör följande sju områden:

- humaniora och samhällsvetenskap
- naturvetenskap och teknikvetenskap
- medicin och hälsa
- utbildningsvetenskap
- konstnärlig forskning
- utvecklingsforskning
- forskningsinfrastruktur

FORSKNINGENS FRAMTID! ÄMNESÖVERSIKT 2014 NATURVETENSKAP OCH TEKNIKVETENSKAP

VETENSKAPSRÅDET

Box 1035

SE-101 38 Stockholm, SWEDEN

© Swedish Research Council

ISBN 978-91-7307-255-7

**FORSKNINGENS FRAMTID!**

**ÄMNESÖVERSIKT 2014**

**NATURVETENSKAP OCH TEKNIKVETENSKAP**

---

## MEDVERKANDE

---

### Ämnesrådet för naturvetenskap och teknikvetenskap

Anders Rantzer (Ordförande), professor i reglerteknik, Lunds universitet  
Henrik Cederquist, professor i fysik, Stockholms universitet  
Dan Henningson, professor i fluidmekanik, Kungliga Tekniska högskolan  
Olle Häggström, professor i matematisk statistik, Chalmers tekniska högskola  
Kristina Luthman, professor i läkemedelskemi, Göteborgs universitet  
Ellen Moons, professor i materialfysik, Karlstads universitet  
Ruth Palmer, professor i molekylär genetik, Göteborgs universitet  
Per Persson, professor i molekylär geokemi, Lunds universitet  
Anna Qvarnström, professor i zoekologi, Uppsala universitet

### Vetenskapsrådet

Lars Kloo, huvudsekreterare för naturvetenskap och teknikvetenskap  
Dan Holtstam, analytiker/redaktör  
Emma Olsson, koordinator för naturvetenskap och teknikvetenskap/redaktör

### Skribenter

Se listning på sid 23.

---

# FÖRORD

---

Ämnesöversikt 2014: Naturvetenskap och teknikvetenskap är en framtidsinriktad översikt av tillståndet i svensk forskning. Översikten ingår som en del i det kunskapsunderlag som Vetenskapsrådet sammanställt för att bidra med beslutsunderlag inför regeringens kommande forskningsproposition och för prioriteringar inom ämnesråd, råd och kommittéer. Den kan även användas som referensmaterial av forskningsfinansiärer, lärosäten och andra aktörer inom forskningssektorn.

Översikten har tagits fram av Vetenskapsrådets ämnesråd för naturvetenskap och teknikvetenskap. En betydande del av underlaget består av ämnesöversikter. Dessa texter baseras till stor del på texter inskickade av sakkunniga skribenter som valts ut av ämnesrådet; texter som sedan bearbetas av ämnesrådets ledamöter som även skrivit områdesöversikter. Många av de sakkunniga skribenterna har även bidragit till bearbetningen av texterna. Ämnesöversikten består av en sammanfattning för hela området naturvetenskap och teknikvetenskap och de individuella ämnesöversikterna.

De individuella ämnesöversikterna har under hösten 2014 också lagts ut på webbforum och kommenterats av aktiva forskare runt om i landet. Ämnesrådet för naturvetenskap och teknikvetenskap har sedan sammanvägt all information till en slutlig version av ämnesöversikterna inkluderande en sammanfattning med strukturella rekommendationer.

Ytterligare underlag till ämnesöversikten har utgjorts av strukturella analyser som tagits fram av Vetenskapsrådets avdelning för forskningspolitik.

Jag vill rikta ett stort tack till alla skribenter, engagerade forskare och ämnesrådet för naturvetenskap och teknikvetenskap som deltagit i framtagandet av denna ämnesöversikt.

Stockholm 2015-01-14

Lars Kloo,  
Huvudsekreterare för naturvetenskap och teknikvetenskap, Vetenskapsrådet

---

# INNEHÅLL

---

FÖRORD .....	3
SAMMANFATTNING .....	7
SUMMARY .....	9
REKOMMENDATIONER .....	11
Ämnesmässiga/tematiska rekommendationer .....	11
Strukturella rekommendationer .....	11
FORSKNINGENS GENOMSLAG .....	13
Vikten av grundforskning .....	13
Matematik och datavetenskap .....	14
Fysik och materialvetenskap .....	15
Teknikvetenskap .....	16
Biologi, geovetenskap och kemi .....	17
MORGONDAGENS UTMANINGAR .....	19
Grundforskning och samhällets utmaningar .....	19
Anställningar och finansieringssystem .....	19
Kvinnliga forskare inom NT-området .....	20
Infrastruktur .....	20
Byråkratisering .....	21
Kvalitetsproblemet med statistik i empiriska vetenskaper .....	22
Vetenskapens ansvar .....	22
INDIVIDUELLA ÄMNESÖVERSIKTER .....	23
Skribenter .....	23
BIOTEKNIK .....	25
Övergripande områdesbeskrivning .....	25
Bioteknik .....	25
BIOVETENSKAPER .....	30
Övergripande områdesbeskrivning .....	30
Cell- och molekylärbiologi .....	30
Ekologi .....	33
Genetik och systematik samt bioinformatik .....	36
Organismbiologi .....	38
DATA- OCH INFORMATIONSVETENSKAP .....	41
Övergripande områdesbeskrivning .....	41
Algoritmer .....	41
Bildanalys och visualisering samt interaktionsdesign .....	44
Datorsystemteknik .....	47
Programvaruteknik .....	50
ELEKTROTEKNIK .....	54
Övergripande områdesbeskrivning .....	54
Elektronik, sensorik och radioteknik .....	54

Elteknik .....	57
Halvledarteknik, fotonik och kvantinformation .....	59
<b>FYSIK .....</b>	<b>63</b>
Övergripande områdesbeskrivning .....	63
Astronomi och astrofysik .....	64
Astropartikelfysik, kärnfysik och partikelfysik .....	67
Atomfysik och molekylfysik .....	70
Fusions-, rymd- och plasmafysik .....	73
Kondenserade materiens fysik .....	76
Teoretisk och matematisk fysik .....	79
<b>GEOVETENSKAPER .....</b>	<b>83</b>
Övergripande områdesbeskrivning .....	83
Atmosfärvetenskap .....	84
Exogen geokemi .....	87
Geologi och geofysik .....	89
Oceanografi, hydrologi och glaciologi .....	92
<b>KEMI .....</b>	<b>96</b>
Övergripande områdesbeskrivning .....	96
Biokemi .....	96
Fysikalisk och analytisk kemi .....	99
Oorganisk kemi .....	102
Organisk kemi .....	104
Teoretisk kemi .....	107
<b>KEMITEKNIK .....</b>	<b>111</b>
Övergripande områdesbeskrivning .....	111
Processteknik för användning av biomassa – Cellulosa, papper och bioraffinaderier .....	114
Kemisk processteknik och livsmedelsteknik .....	114
<b>MATEMATISKA VETENSKAPER .....</b>	<b>118</b>
Övergripande områdesbeskrivning .....	118
Algebra, geometri och talteori .....	119
Matematisk analys .....	121
Beräkningsmatematik, optimering och matematisk modellering .....	124
Diskret matematik och logik .....	127
Sannolighetsteori och statistik .....	129
<b>MATERIALVETENSKAP .....</b>	<b>133</b>
Övergripande områdesbeskrivning .....	133
Halvledarmaterial, keramer och glaser .....	133
Metalliska material .....	136
Polymera material och kompositer samt biomaterial .....	139
<b>MEDICINSK TEKNIK .....</b>	<b>142</b>
Övergripande områdesbeskrivning .....	142
Medicinsk teknik .....	142

SYSTEMTEKNIK.....	144
Övergripande områdesbeskrivning .....	144
Kommunikationssystem.....	144
Reglerteknik.....	147
Robotik och automation.....	149
Signalbehandling .....	152
TEKNISK MEKANIK .....	156
Övergripande områdesbeskrivning .....	156
Biomekanik .....	156
Fastkroppsmekanik .....	159
Fluiders mekanik och teknisk akustik.....	162
TEKNISK OCH TILLÄMPAD FYSIK.....	165
Övergripande ämnesbeskrivning.....	165
Teknisk och tillämpad fysik.....	165



---

# SAMMANFATTNING

---

Ämnesöversikterna visar att svensk naturvetenskaplig och teknikvetenskaplig forskning är internationellt konkurrenskraftig och även världsledande inom ett brett spektrum av ämnen. Den svenska forskningens främsta styrka är dess kombination av bredd och djup. Detta kan delvis kopplas till Vetenskapsrådets forskardrivna finansieringsmodell. Översikterna lyfter fram flera centrala strukturella problemområden. Ett av dessa är de ökande inslagen av ämnesöverskridande forskning som kan vara svår att bedöma, samtidigt som behovet av den traditionellt ämnesbundna forskningen kvarstår. Att hitta balansen mellan ämnesmässig fördjupning och förändring är en utmaning. Likaså kan strävan att behandla alla ämnen inom NT-området på samma sätt leda till oavsiktlig orättvisa, istället behöver ämnenas särart beaktas. Exempelvis finns uppenbara skillnader mellan teoretisk och experimentell forskning, liksom mellan nyfikenhetsdriven forskning och forskning med klart uttalade mål för konkreta tillämpningar.

De kvantitativa mått på kvalitet som idag i praktiken fått stort genomslag vid bedömning av forskningskvalitet har fått en del oönskade konsekvenser. Stora forskningsområden har en tendens att växa, medan mindre områden kan utarmas. Denna problematik är till del kopplad till universitetens svaga grundfinansiering. En liknande problematik noteras för utveckling av helt nya teorier, för ny metodik eller instrumentering. Detta är verksamheter, som ofta har en förhållandevis låg publiceringstakt och åtminstone initialt röner ganska begränsad uppmärksamhet i form av citeringar. Samtidigt utgör en sådan verksamhet en nödvändig grund för vetenskapens fortsatta utveckling. Det finns således goda skäl att se över de meriteringssystem som tillämpas när vetenskaplig verksamhet utvärderas.

Det pågår en balansförskjutning mellan tillämpad och mer grundläggande forskning, där den senare får en allt svagare ställning. Detta är olyckligt, eftersom dessa olika typer av forskningsverksamheter är beroende av varandra. Den bästa tillämpade forskningen vilar typiskt på ett starkt grundvetenskapligt fundament. Grundforskningen har i detta sammanhang en mycket stor pedagogisk utmaning. Även om den nödvändiga kunskapen för gårdagens liksom morgondagens utmaningar genererats ur framstående och nyfikenhetsbaserad grundforskning, är detta ursprung oftast djupt begravt i mer problemorienterade forskningsprojekt. Grundforskningen riskerar då att bli osynlig och i värsta fall upplevs den som onödig. Inte alla inser att dagens IT-baserade samhälle bygger på grundläggande studier av halvledare och abstrakta funktionsrum.

Finansiering av forskare på olika nivåer vid landets universitet och högskolor har stegvis förskjutits från lärosätena till externa finansörer. Vetenskapsrådets bidrag har därigenom omvandlats från att vara ett avgörande stöd till landets bästa forskning till att också bli en nödvändig del av lärosätenas finansiering. Detta är en olycklig utveckling, och Vetenskapsrådet bör i dialog med lärosätena finna en tydligare rollfördelning när det gäller forskningsfinansiering och rekrytering av forskare.

Infrastruktur representerar en tämligen komplicerad karta, där gränsen mellan nationellt och lokalt ansvar idag är mycket otydlig. Exempel på nationellt/internationellt ansvar utgörs av de stora infrastrukturåtgångarna i Lund, MAX IV och ESS. Finansieringen av dessa kräver både långsiktighet och tydlighet för alla direkt och indirekt inblandade. En specifik fråga, som snabbt kan bli akut, är vikten av att undvika att eventuellt skenande konstruktions- och driftskostnader för ESS dränerar annan forskning på resurser. Det finns också ett problem gällande ansvar för mindre, men för enskilda forskargrupperingar likväl mycket dyra, anläggningar. Detta är en typ av infrastruktur som numera ofta inte har någon uppenbar finansieringsform och Vetenskapsrådet bör här i dialog med lärosätena tydligare beskriva sin roll och sitt ansvar.

Flera forskningsområden kan generera resultat som får mycket stora konsekvenser för vårt framtida samhälle. Forskningsetiska överväganden i hanteringen av enskilda ansökningar till Vetenskapsrådet bör därför tydliggöras. En ännu större utmaning är att kontinuerligt analysera möjligheter och risker associerade med teknikutvecklingen som helhet och dess samspel med samhälle och miljö. Detta kommer framöver att ställa allt större krav på forskarnas förmåga att se stora sammanhang och kommunicera med det omgivande samhället. Internationell samverkan är här en förutsättning. Vetenskapsrådet bör ta en ledande roll i denna analys.

Behovet av grundvetenskap är idag och i framtiden mycket stort. Det är samtidigt en utmaning för forskarsamhället att hantera samhällets önskemål om omedelbart nyttiga tillämpningar (de stora utmaningarna)

och snabba vetenskapliga genomslag (till exempel i form av bibliometriska data). Här har Vetenskapsrådet ett stort ansvar att stärka och bevara en stark grundvetenskaplig, nyfikenhetsdriven forskning. Vem vet inom vilket område nästa stora vetenskapliga genombrott med potential att förändra vårt samhälle kommer att ske? Dock vet vi att för nå dit krävs stark grundforskning som är oberoende av mer tillämpningsnära forskning. Medvetna etiska överväganden är centrala både för grund- och tillämpad forskning.

---

## SUMMARY

---

The subject overviews show that not only is Swedish research in natural and engineering sciences internationally competitive, it also enjoys a world class position in a wide range of subjects. The main strength of Swedish research lies in the combination of breadth and depth. This can be partially attributed to the strong researcher-driven funding model of the Swedish Research Council. The overviews highlight several important structural areas of concern. One of these areas relates to the increase in multidisciplinary research (sometimes difficult to assess), which co-exists with the remaining need for traditional, subject-specific research. Striking the balance between subject specialisation and change is a challenge. Likewise, the ambition to treat all subjects in the fields of science and technology in the same way may result in unintentional unfair treatment. Instead, the specificities of the subjects need to be taken into consideration. There are for example clear differences between theoretical and experimental research, as well as between curiosity-driven research and research with clearly defined objectives for the specific applications.

The quantitative tools developed to measure quality, which in practice have a major impact on the assessment of the research quality today, have had several undesirable consequences. Major research areas have tended to grow, while smaller areas have tended to decrease in size. This problem is partially attributable to the low levels of core government funding to universities. A similar problem has been noted in respect to the development of completely new theories, new methods or new instrumentation. These are activities, which often have a relatively low publication rate, and, at least in the initial phase, receive relatively limited attention in the form of citations. However, they constitute a necessary foundation for the continued development of science. There are therefore good reasons to review the evaluation systems used in the scientific quality assessment procedure.

The balance between applied and more fundamental research is changing, creating an increasingly weak position for the latter category. This is unfortunate since these different research types are interdependent. The best applied research is typically based on a strong foundation of fundamental knowledge. The pedagogical challenge in this respect will be to demonstrate the relevance of fundamental research. Even though the knowledge needed to face both previous and future challenges originates from prominent and curiosity-driven fundamental research, this origin is often not apparent in the more problem-oriented research projects. Fundamental research thereby runs the risk of becoming invisible. In a worst case scenario, it might even be considered unnecessary or irrelevant. Not everyone is aware of the fact that the today's information society is built on fundamental studies of semiconductors and abstract functional spaces.

The funding of research conducted at various levels at Swedish HEIs has gradually been shifted from the institutions to external funders. Whereas the grants awarded by the Swedish Research Council previously provided crucial support to Sweden's best research, they now also form an essential part of the core funding of the Swedish HEIs. This is an unfortunate development, and the Swedish Research Council should therefore identify a proper division of the responsibilities, in consultation with the HEIs, with respect to research funding and researcher recruitment.

The situation in the research infrastructure area is unclear when it comes to the boundary between national and local responsibility. The responsibility for the major infrastructure facilities in Lund, MAX IV and ESS, lies on the national/international level. The financing of these facilities requires both a clear and long-term perspective for all parties (directly or indirectly) involved. One specific issue in this regard concerns the need to avoid a situation where the construction and operating costs of the ESS facility escalate at the expense of other research activities. Such a situation could quickly become an urgent problem. Another issue concerns the responsibility for smaller and local infrastructure facilities, which are still very expensive to use for small groups of researchers. Since this type of infrastructure lacks a clear form of funding in many cases today, the Swedish Research Council will have to define a clearer description of its role and responsibility in this regard to the HEIs.

Several research areas could generate new results that would have a significant impact on our future society. The ethical considerations used by the Swedish Research Council in the assessment of individual applications should therefore be clarified. Another major challenge involves the continuous analysis of opportunities and

risks associated with technological progress, as a whole, and its interaction with society and the environment. In the future, this will place greater demands on the ability of researchers to take in the bigger picture and to communicate with the society. International collaboration regarding such issues is a prerequisite for this work. The Swedish Research Council should take a leading role in this analytical process.

There is a great need for fundamental knowledge, both today and for the future. At the same time, the research community is struggling with the question of how to meet the demands for immediately useful applications that emanate from the society (the big challenges), and for rapid scientific breakthroughs (for example in the form of bibliometric data). The Swedish Research Council has a profound responsibility to reinforce and maintain a high level of fundamental and curiosity-driven research. Who knows in what area the next major scientific breakthrough, with the potential to change our society, will be made? What we do know however, is that to achieve such breakthroughs, we need a vigorous fundamental research that does not depend on the more application-oriented research. Awareness of ethical considerations is key to both fundamental and applied research.

---

# REKOMMENDATIONER

---

## Ämnesmässiga/tematiska rekommendationer

- Allt fler aktiva forskningsområden är spridda över flera traditionella ämnen och saknar naturlig vetenskaplig hemvist. Vetenskapsrådet behöver utveckla rutiner för att identifiera sådana ämnen och säkerställa att de får en god hantering i ansökningsprocessen. Ett exempel på ett sådant område är bioinformatik, vars ansökningar dels är spridda över flera olika beredningsgrupper och dessutom innehåller en gränsdragningsproblematik såväl rörande ämnestillhörighet som mellan forskning i projektform och uppbyggandet av nödvändig infrastruktur.
- Infrastruktur för teknikvetenskap är i stort behov av nationell samordning. Vi föreslår att Vetenskapsrådet gör en behovsinventering och uppdaterad strategi inom detta område.
- På senare år har det uppstått ett alltmer tydligt behov av nationell e-vetenskaplig infrastruktur för forskning härbärgerad på stora datacentra. Detta innefattar både hårdvara och s.k. applikationsexperter och forskningsingenjörer, vilka kan arbeta tillsammans med forskare inom de tillämpade fälten för att både utveckla och tillgängliggöra nödvändiga e-vetenskapsmetoder. Vi föreslår att Vetenskapsrådet gör en särskild satsning på e-vetenskap koordinerad mellan ämnesråden och RFI för att utveckla metoder nödvändiga för de forskare som ska använda infrastrukturen. Det är viktigt att infrastruktur för e-vetenskap inte bara är tillgänglig som resurs för andra vetenskapsområden, utan också är utformad för att användas som testbädd för data- och systemvetenskaplig forskning. Denna satsning bör vara samordnad med RFI-satsningar på infrastrukturen.
- Ett stort kvalitetsproblem inom vetenskapen är bristen på statistisk kompetens inom ett brett spektrum av empiriska vetenskaper. Vetenskapsrådets särskilda satsning *Statistik i empiriska vetenskaper*, med utlysningar 2012 och 2013, är en åtgärd i rätt riktning och bör därför ges en fortsättning.
- Metod-, teknik- och teoriutveckling är avgörande för vetenskapliga framsteg inom traditionella forskningsområden, inom nya tvärvetenskapliga områden samt för tillämpad forskning. Det är i detta sammanhang speciellt viktigt att grunden för dessa verksamheter – kunskapsuppbyggnaden inom grundläggande ämnen som matematik, fysik, och kanske speciellt kemi får särskilt stöd. En eventuell satsning för att stärka dessa områden bör föregås av en utredning för att identifiera behov, inriktning och avgränsningar.

## Strukturella rekommendationer

- Det råder idag en stor oklarhet rörande anställningsformer och karriärvägar vid våra lärosäten. Det finns särskilt en otydlighet i ansvar för finansiering av lönekostnader, där Vetenskapsrådets finansiering av lönebidrag i flera fall blivit en nödvändig del av finansieringen av institutionernas verksamheter istället för ett tydligt stöd till särskilt framgångsrik och/eller lovande forskning. Lärosätena behöver ta ett större ansvar för sin fakultet, både avseende rekrytering och för att skapa goda förutsättningar för framgångsrik forskning. Vetenskapsrådet bör här i samråd med lärosätena definiera sin roll och se över sina bidragsvillkor.
- Vetenskapsrådets projektbidrag är fundamentala för utvecklingen av svensk grundforskning. Denna finansieringsform måste därför prioriteras så att både beviljningsgraden och medelbidragen kan öka.
- Grundvetenskapliga genombrott sker inte sällan genom långsiktiga teoretiska och/eller experimentella teknik- eller metodutvecklingar. Dock är det idag riskfyllt för forskare att ge sig in i denna typ av utvecklingsarbete då publiceringstakten kan gå ner under en tid. Den stora betydelsen av teknik- och metodutveckling kvarstår dock, och därför bör Vetenskapsrådet se över sina meriteringskriterier och kanske även finansieringsformerna för denna viktiga del av forskningen.
- Vetenskapsrådet bör överväga om man på ett tydligare sätt än idag ska beakta bidrag från andra finansierare för en sökande i samband med bedömningar av ansökningar. Naturligtvis ska det inte vara demeriterande att ha tillgång till andra bidrag för sin forskning, men den totala anslagsbilden bör beaktas. Vetenskapsrådet bör också se över rutiner för att säkerställa att forskare inte får flera bidrag för samma projekt. Ett exempel på

denna problematik är att ansökningar med samma innehåll idag kan beviljas av både Vetenskapsrådet och Formas.

- Vetenskapsrådet måste på ett tydligare sätt agera språkrör för grundforskningen och aktivt förklara dess långsiktiga roll och centrala betydelse för kunskapens utveckling och för samhällets stora utmaningar.
- Vetenskapsrådet bör bidra till att kontinuerligt analysera möjligheter och risker associerade med teknikutvecklingen och dess samspel med samhälle och miljö.
- Forskningsinstitutet Nordita (inom teoretisk fysik) och Institut Mittag-Leffler (inom matematik), varav speciellt det senare genom sin unika historia har en internationell särställning, måste ges en långsiktigt stabil finansieringssituation.
- Hanteringen av bristande forskareetik vid Vetenskapsrådet är otydlig och detta gäller även ansvarsfördelningen mellan Vetenskapsrådet och lärosätena. Denna otydlighet i ansvar och hanteringsrutiner bör åtgärdas.

---

# FORSKNINGENS GENOMSLAG

---

## Vikten av grundforskning

Det kanske mest dramatiska exemplet de senaste decennierna på hur vetenskapen påverkat våra liv är att telekom- och informationsteknologin gjort oss ständigt uppkopplade. Vi är bara några knapptryckningar från informationsmängder flera tiopotenser gånger större än det lokala bibliotek som för inte så länge sedan var stället man gick till då uppslagsverket hemma i vardagsrummet inte var tillräckligt. Även om vi minns tiden före Internet har vi svårt att förstå hur man egentligen klarade av enkla vardagssysslor som att planera och boka en resa. Den snabba förändringstakten förväntas hålla i sig, bland annat genom det snabbt växande Internet-of-Things. Allt fler av våra tillhörigheter kopplas upp för fjärrkontroll och samordnad automatisk reglering. Vi får tillgång till fortlöpande övervakning av hälsovariabler som blodtryck och hjärtrytm, och våra fordons navigeringssystem kommer på ett allt mer sofistikerade vis ta hänsyn till den övriga trafiksituationen. Framgångsrika försök med förarlösa bilar reser frågan om vi över huvud taget kommer att själva framföra våra (i framtiden även förhoppningsvis miljövänliga) bilar mer än ett par årtionden till. Denna utveckling bygger på grundforskning inom bland annat datalogi, systemteknik, kommunikationsteori, signalbehandling och materialvetenskap, vilka i sin tur vilar på grundläggande och ständigt fördjupade kunskaper inom matematik, fysik och kemi.

Minst lika stor, om än något mindre uppenbar, är betydelsen av de miljövetenskapliga framsteg som ger varningssignaler om storskaliga förändringar i vår livsmiljö. Jordens biosfär har visat sig vara inte fullt så osårbar som man allmänt trodde fram till Rachel Carsons *Tyst vår* på 1960-talet. En miljövetenskaplig framgångssaga är hur forskare på 1970-talet upptäckte att det livsviktiga ozonskiktet var på väg att uttunnas, och att orsaken bestod i mänskliga utsläpp av bl.a. freoner. Upptäckten ledde så småningom till det så kallade Montrealprotokollet 1987, en internationell traktat som trädde i kraft 1989 och som förbjuder sådana utsläpp. Ozonlagret är nu på väg mot en återhämtning, vilket visar att djupa kunskaper om de grundläggande processerna tillsammans med en samlad global strategi har alla förutsättningar att leda utvecklingen i positiv riktning. Denna typ av kraftsamling kommer även att behövas för att hantera och motverka effekter av mänsklighetens påverkan på klimatet. En nödvändig förutsättning för att kunna göra något åt miljöproblemen är emellertid att vi känner till dem och förstår deras orsaker. Här spelar den grundläggande vetenskapen en central roll. Vem vet vilket allvarligt problem vi upptäcker närmast?

Den nyfikenhetsdrivna grundforskningens betydelse för ofta helt oförutsedda tillämpningar kan knappast överskattas. Som ett exempel kan nämnas hur den linjära algebrans spektralteori erbjöd den byggsten som gav Google ett avgörande övertag mot andra tidiga söktjänster på Internet, och hur grundforskning i kemi och fysik banat väg för så olika produkter som mer högpresterande batterier, pekskärmar, supraleddare, laserövervakning av luftföroreningar, solceller, samt positronemissionstomografi och en rad andra avancerade diagnos- och behandlingsformer.

Det finns en utbredd missuppfattning att satsning på tillämpad forskning, t.ex. riktade mot stora utmaningar för samhället, per automatik också tillgodoser behovet av nödvändig grundforskning för att de tillämpade målen ska kunna uppnås. Dessvärre är detta en myt och forskning fungerar inte, utom i mycket få undantagsfall, på det sättet. Det krävs ett brett utrymme för grundforskning, där kravet på tillämpning är nedtonat; ett utrymme där ny kunskap kan sökas med lång tidshorisont och där kreativitet frodas och nya fenomen kan utforskas fritt, helt utan krav på omedelbar nytta. Den kunskap som vinnas här utgör sedan en ovärderlig grund för lika viktiga och mer tillämpade vetenskapliga frågeställningar.

Behovet av ett rikt bibliotek av grundläggande kunskap glöms ofta bort då allt strålkastarljus hamnar på den slutliga produkt, som i många fall orsakat genomgripande förändringar i samhället. En sådan baskunskap är t.ex. förmågan att förstå och beskriva egenskaperna hos de halvledare som utgör hjärtat i transistorn. Den är själva basen för den explosion av konsumentprodukter som sedan 1990-talet är inriktade mot IT och kommunikation; mobiltelefoner, trådlöshet, smart TV, etc. Många kan använda den tekniken och samtidigt ifrågasätta värdet av grundläggande forskning, eftersom dess bidrag till den slutliga industriella produkten inte är uppenbar vid en ytlig betraktelse. Material med halvledande egenskaper upptäcktes redan på 1800-talet, men

det var inte förrän under första halvan av 1900-talet som dessa märkliga fenomen undersöktes och karaktäriserades mer i detalj. Hade inte grundforskning kring halvledande materials fundamentala egenskaper utförts och insikter vuxit fram att deras elektriska ledningsförmåga kan kontrolleras så hade vi kanske fortfarande arbetat med trådburen telefoni och manuella växelsystem. Idag utförs mycket grundforskning kring möjligheten att använda elektronens spinn, dvs en effekt från den relativistiska kvantmekaniken, snarare än dess laddning, som informationsbärare. Inom kvantoptiken studerar man så kallade sammanflätade kvanttillstånd för eventuella framtida tillämpningar inom kvantdatorer och kvantkryptografi. Kanske finns här grunden till morgondagens teknik i var persons hand.

Ett ytterligare exempel kan hämtas från läkemedelsindustrin. Många av de mest omskrivna läkemedlen vilar tungt på kunskap hämtad från grundforskning. Utan framsteg inom organisk syntes, där ambitionen enbart varit den intellektuella utmaningen att kunna bygga nya molekylära system, hade man inte kunnat tillverka läkemedlen eller åtminstone inte till ett pris som gör läkemedlet tillgängligt för en större patientgrupp. Utvecklingen av nya läkemedel behöver grundläggande kunskaper hämtade från studier inom cellbiologi, genetik och biokemi, rörande vilka proteiner som är förknippade med olika sjukdomstillstånd och hur dessa samverkar med olika substrat, samt från strukturkemi, som ger kunskap om hur nya läkemedel behöver vara utformade för att kunna motverka en sjukdom eller dess symptom. Mer fokus bör därför ligga på den kunskap som utgör själva grundförutsättningen för att kunna utveckla nya klasser av läkemedel.

## Matematik och datavetenskap

I de matematiska vetenskaperna har den extraordinärt starka ställning som analysen hade i Sverige under stora delar av 1900-talet ersatts av ett mer mångfacetterat forskningslandskap. Detta är en styrka, då utvecklingen inom matematik allt mer går mot att tidigare orelaterade delområden knyts samman på nya och oväntade vis. Områden som beräkningsmatematik och matematisk statistik frodas i tvärvetenskapliga samarbetsprojekt, men hämtar också näring i matematikens mer klassiska grenar som analys, algebra och geometri. Den viktigaste rekommendation som kan ges i fråga om de matematiska vetenskaperna är därför att deras fulla bredd behövs och att vi bör låta tusen blommor blomma. Detta är ett allmänt behov inom grundvetenskapen, där dagens kvantitativa meriteringssystem på ett ofta olyckligt vis premierar stora forskningsområden och kanske även i viss utsträckning större forskargrupperingar framför mindre.

Behovet av mångfald i finansieringsformer märks tydligt både i matematiken och i fysikens mer teoretiska delar. Inom dessa ämnen samlas man inte i forskargrupper kring avancerade försöksuppställningar, och den individuella forskarens samarbetspartners tenderar därför att vara mer globalt utspridda. Följaktligen blir stora forskningsmiljöstöd ofta mindre effektiva på dessa områden, jämfört med om motsvarande summa satsades på fler och mindre individstöd. De båda forskningsinstituten Nordita (fysik) och Institut Mittag-Leffler (matematik) har stor betydelse som vetenskapliga mötesplatser både för svensk forskning och internationellt, men de behöver få en långsiktigt stabil finansieringssituation; något de inte har idag.

Datavetenskap är det ämne som sedan millennieskiftet kanske allra tydligast gjort avtryck i vår vardag, något som kan väntas fortgå under lång tid, och som är en följd av ämnets snabba utveckling. Denna manifesteras bland annat i den extrema ökning i hårdvaruprestanda som upprätthållits i decennium efter decennium, och som brukar följa den så kallade Moores lag (hur antalet transistorer som får plats på ett chip fördubblas vartannat år). Idag håller emellertid inte ens denna ökning jämna steg med den växande storleken på de datamängder som genereras och skall analyseras inom ett stort antal vetenskapsområden – den så kallade Big data-trenden. Denna skapar nya utmaningar för datavetenskapen (liksom matematiken), och behov av nya tekniker uppstår såsom parallellism och distribuerad beräkning inklusive så kallad cloud computing. Ett annat viktigt område är heterogena hårdvarusystem, för att hantera det ökande problemet med energi- och effektutveckling som den alltmer kompakta elektroniken fört med sig. Inget av dessa områden får dock överskugga behovet av fortsatt bredd i svensk datavetenskap, alltifrån teoretisk algoritmteori och programvaruteknik till bildanalys och interaktionsdesign. Det är lätt att behovet av grundforskning inom dessa områden drunknar i skenet av tillämpningens möjligheter.

Den snabba utvecklingen av datorkapacitet och möjligheter till lagring och bearbetning av stora datamängder har gjort att ett helt nytt tvärvetenskapligt fält har vuxit fram, ofta kallad e-vetenskap. Fältet omfattar



verksamheter som med datorer simulerar fenomen inom vitt skilda vetenskaper t ex klimatforskning, kemi, astrofysik, fasta tillståndets fysik, bioinformatik och strömningsmekanik. Dessutom omfattar det bearbetning av stora datamängder som härrör från sådana simuleringar men även analys av andra stora mängder data som produceras inom experimentell forskning eller som existerar i stora dataregister. Några exempel är sekvensdata inom livsvetenskaperna, data från LHC och andra stora infrastrukturer samt data från humaniora och samhällsvetenskap. Forskning inom e-vetenskap handlar om de metoder som behövs för att kunna göra simuleringar och för att kunna bearbeta de stora datamängderna, och den är nära knuten till den dator- och lagringsinfrastruktur som krävs. Sådana metoder använder kunskap från matematisk modellering, numerisk analys, parallella algoritmer, visualisering, etc. Den kombineras ofta på ett tvärvetenskapligt sätt för att kunna lösa problem inom de olika tillämpningarna. Möjligheterna till vetenskapliga framsteg som e-vetenskapen ger har kartlagts på ett utmärkt sätt i Vetenskapsrådets utredning "Swedish science cases for e-infrastructure" färdigställd under 2014 av RFI.

## Fysik och materialvetenskap

Fysikämnet är lika mångfacetterat som matematiken, det utvecklas ständigt i nya riktningar allteftersom nya upptäckter och genombrott görs. Fysikämnet spänner från den matematiska fysiken där inspiration från fysikens problemställningar kan bidra till utvecklingen av ny matematik, till den grundläggande kondenserade materiens fysik med kopplingar till praktiskt inriktad materialvetenskap, studier av dynamiska förlopp i enskilda atomer och molekyler, identifiering av nya grundämnen inom kärnfysiken, till partikel- och astrofysikens utforskande av materiens allra minsta byggstenar vid CERN och med teleskop. I Sverige finns mycket starka verksamheter inom dessa områden. Att ett svenskt lärosäte tjänar som huvudnod för EU:s flaggskeppsprojekt om grafén är givetvis en stor fjäder i hatten för svensk forskning, och det är rimligt att försöka dra nytta av detta och stödja forskning inom angränsande områden samtidigt som det är av än större vikt att stödja den fria nyfikenhetsdrivna forskningen. En stor del av fysiken och astronomin utnyttjar internationella och nationella forskningsinfrastrukturer. Medlemskap i internationella organ och organisationer t ex CERN och ESA (European Space Agency) är nödvändiga men även nationella anläggningar har stor betydelse. MAX IV i Lund erbjuder goda möjligheter att stärka svensk forskning inom atom-, molekul- och klusterfysiken. MAX IV och ESS är viktiga redskap för materialvetenskapen, och skapar också förutsättningar för framgångsrik forskning inom den tillämpade fysiken. Inom den experimentella kondenserade fysiken och materialfysiken finns ett behov av ett nationellt stöd för användandet av renrumsfaciliteter och tillhörande analysutrustning (Myfab). Det är av stor vikt att satsningarna på de stora infrastrukturerna inte försämrar möjligheterna för stöd till mindre befintliga eller nya infrastrukturer eller för stöd till fria projekt vid anläggningarna eller oberoende av dessa.

Nanovetenskapens breda intåg i svensk forskning var en tydlig trend redan vid millennieskiftet, och den fortsätter, vilket är viktigt inte minst för utvecklingen av nya komponenter inom informationsteknologin. Till de fysikområden som däremot riskerar att bli subkritiska och kan behöva stärkas hör vissa delar av den svenska forskningen i plasmafysik. En påtaglig brist i det svenska fysiklandskapet är avsaknaden av experimentell verksamhet inom det internationellt så viktiga området med ultrakalla atomer och Bose-Einsteinkondensat. Det vore önskvärt att det byggs upp internationellt konkurrenskraftig forskning inom detta område åtminstone vid något svenskt lärosäte.

Materialvetenskap är ett brett område i gränslandet mellan fysik, kemi och teknik, och grunden till många tekniska tillämpningar. Materialvetenskaplig forskning spelar en viktig roll i framtidens utveckling inom miljö, energi och hälsa, där uppgiften att framställa skräddarsydda funktionella material med specifika egenskaper är en stor utmaning. Halvledarmaterial är nyckeln till att extrahera energi ur förnyelsebara källor, att reducera energiförluster och att utveckla energilagringsskapacitet. Forskningen om nedbrytbara material och biomaterial är allt viktigare, samt förnyelsebara konstruktionsmaterial för hållbar materialutveckling. Sverige har både excellenta forskare och starka tvärvetenskapliga forskningsmiljöer i materialområdet. Materialkaraktisering kräver tillgång till avancerade och moderna instrument och högpresterande datorer. Materialforskarna är i hög grad beroende av nationell och internationell infrastruktur, som MAX IV, ESS, Myfab och SNIC.

# Teknikvetenskap

Systemteknik är ett relativt ungt vetenskapligt område där Sverige har en stark ställning. Detta har haft stor betydelse för svenskt näringsliv inom exempelvis fordonsteknik, processindustri, telekommunikation och hälsovård. Systemtekniken ger systematiska metoder för att få ett stort antal komponenter att samverka till en fungerande helhet. För detta utnyttjas teori och modeller från matematik, statistik och datalogi. Ett systemtekniskt ämne som tidigt vann en stark ställning i Sverige är reglerteknik. Svensk forskning har starkt bidragit till att skapa en teoretisk grund för reglertekniken och är idag internationellt ledande på flera områden. Under senare år har tillgången på billiga komponenter för mätning, styrning, beräkningar och kommunikation öppnat för en rad nya reglertekniska tillämpningar, exempelvis inom energiteknik och medicinsk teknik. Reglertekniken har därmed blivit en nyckelteknologi för ett hållbart samhälle där resurser utnyttjas effektivt. Angränsande ämnen är kommunikationssystem och signalbehandling, som nått internationella framgångar i synergi med svenska telekommunikationsföretag. Säker och robust trådlös kommunikation till en rimlig kostnad är grundläggande för många samhällsutmaningar. Samtidigt har den explosionsartade utvecklingen av Internet lett till en djupgående växelverkan mellan tekniska lösningar och sociala beteendemönster. För att förstå och utnyttja möjligheterna krävs gränsöverskridande grundforskning. Till systemtekniken räknar vi också robotik och automation. Grundforskning inom detta område är också av tvärvetenskaplig karaktär och har stor potential för svensk tillverkningsindustri, samt även exempelvis inom gruvsdrift, sjukvård och äldreomsorg.

Elektroteknik är ett mycket brett ämnesområde, som en gång startade med upptäckten av elektricitet. Effekterna på vårt samhälle har varit genomgripande och fortfarande syns inget slut på möjligheterna. Halvledartekniken har haft en explosionsartad utveckling sedan upptäckten av den första transistor och omsätter idag ofattbara tusen miljarder kronor per år. Fotonik kännetecknas av en hög innovationspotential baserad på nya material och komponentteknologier. Inom vissa delområden bedrivs svensk forskning av världsklass. Elektroniken blir en allt viktigare komponent inom alla samhällsområden och svensk forskning har en stark internationell ställning. Av särskild vikt idag är minskning av effektförbrukningen hos elektroniksystem, dels för stora system (grön teknik), dels för batteridrivna system (längre batterilivslängd, batterilösa system). En nivå upp i fråga om spänningar och fysiska dimensioner återfinns ämnet elteknik. Elteknik är för närvarande i en stark tillväxtfas där omställningen av energisystemet och utvecklingen av transportsektorn är pådrivande faktorer. Introduktionen av nya kraftkällor kräver grundforskning om elkraftsystem och även om nya komponenter.

Teknisk mekanik omfattar traditionellt de vetenskapliga grunderna för ingenjörskonst, bl.a. konstruktion, materialval och tillverkning. Detta gör ämnet strategiskt betydelsefullt för hela spektret av svensk basindustri. Den svenska forskningen står sig väl internationellt på en rad delområden, och en särskilt positiv utveckling syns bl.a. inom strömningsmekaniken, biomekaniken och i fastkroppsmekanikens beräkningsmekaniska delar, beskrivet i Vetenskapsrådets nyligen genomförda utvärdering av området. Den svenska industrin finansierar ofta teknikforskning knuten till specifika tillämpningar. Det är bra att industrin är villig att stödja den tekniska forskningen, men forskning inom grundläggande tekniska frågor är viktig för att den svenska ingenjörsvetenskapen ska kunna upprätthålla en hög nivå på sikt. Det är viktigt både för att locka talang till teknisk forskning och utbildning och för att lägga grunden för att den tillämpade forskningen och utvecklingen ska kunna tillgodose samhällets framtida behov.

Bioteknik är ett område som utvecklats starkt de senaste årtiondena, där landvinningar inom den molekylära biologin i form av genetik, proteomik, metabolomik och bioinformatik kunnat omsättas i nya tekniker inom medicin, miljö, energi och livsmedel. Den medicinska biotekniken har främst tillämpningar inom folksjukdomar, bioläkemedel, individanpassad patientbehandling och stamceller. Även den industriella och miljöinriktade biotekniken har flera tillämpningsområden, såsom bio- och bioenergiproduktion, växt- och skogsbioteknik, livsmedelsbioteknik och skiljning av syntetisk biologi. Sverige har en stark tradition inom framförallt metod- och teknikutveckling. Bioteknikens dramatiska utveckling banar väg för forskning och utveckling inom relaterade områden.

I ett land som Sverige, där skog och malm har utgjort och alltjämt utgör en grundpelare inom ekonomin, är det naturligt att kemiteknisk grundforskning styrd mot utvinning och förädling av dessa naturresurser är viktig. Den kemitekniska forskningen inriktad mot skogen som resurs kan grovt delas upp i forskning om

makromolekyler och biomassa. Här finns ett väsentligt överlapp med biotekniken. Man noterar att den grundläggande kemitekniken lider av att lärosätena saknar egna resurser för att upprätthålla en ämnesmässig baskompetens. Kemisk processteknik och livsmedelsteknik är mångsidig och har ett stort och traditionellt tillämpningsområde. Även inom dess områden finns nära band till biotekniken. Forskning med anknytning till livsmedelsförsörjning, katalys, miljö och energi uppmärksammas särskilt. Avsaknaden av starka miljöer med stor bredd och nödvändig infrastruktur identifieras som ett problem i ambitionen att möta framtida behov av flexibla och komplexa kemiska processer i på olika skalnivåer.

Medicinsk teknik är ett område med starkt tvärvetenskapliga inslag med stor betydelse för vård och omsorg. För svensk exportindustri är det av särskilt strategiskt intresse eftersom den medicintekniska industrin till skillnad mot läkemedelsindustrin är i stark tillväxt. En nyckel till fortsatt framgång ligger i satsningar på både grundforskning och tillämpad forskning.

## Biologi, geovetenskap och kemi

Biologi är ett mycket brett och mångsidigt ämne som sträcker sig från studier av geners funktion till hur hela ekosystem fungerar och till problematik kopplad till människans påverkan av miljön. Det finns flera starka forskningsfält inom biologin i Sverige och en tydlig trend är en ökad integration mellan olika biologiska forskningsområden och även till angränsande fält som kemi, fysik och teknikvetenskap samt medicin, för att möta samhällets behov av biovetenskaplig grundforskning. Många starka biovetenskapliga forskningsområden använder genetiska och bioinformatiska metoder där både utveckling av analystekniker och databehandlingsmetoder spelar en central roll. En stor utmaning är att hitta en balans i forskningsfinansiering mellan stöd till högkvalitativ infrastruktur av detta slag och till starka vetenskapliga projekt som kan utnyttja den. Det är därför viktigt att Vetenskapsrådet har system och verktyg för att analysera balansen mellan bioinformatisk infrastruktur och konkurrenskraftig forskning som är beroende av resultat genererade med denna infrastruktur. På senare tid har även mikroskopitekniken utvecklats kraftigt. Detta är en infrastruktur som krävs för modern biovetenskaplig forskning, och det är en utmaning för Vetenskapsrådet att bidra till att svenska forskargrupper får tillgång till sådan avancerad högteknologisk utrustning.

Det är fortfarande hypotes- och nyfikenhetsdriven forskning som leder fram till många nya upptäckter. Sverige har en bred bas av mycket specialiserade forskargrupper, där gruppstorleken ofta är liten men där man ändå arbetar med komplexa frågeställningar vid den absoluta forskningsfronten. Vetenskapsrådet måste värna om dessa grupper för att på så sätt vidareutveckla kreativiteten och den fria biovetenskapliga grundforskningen i landet. Detta kan illustreras på ett tydligt sätt med de senaste upptäckterna av CRISPR/CAS-editering, vilken kan användas för att specifikt ändra genomet hos en organism. Denna upptäckt är en revolution inom biologin och den medicinska forskningen, och den upptäcktes av, bland annat, små fokuserade svenska forskargrupper.

Geovetenskap omfattar kunskaperna om jordklotets historia – från Jordens bildande till dagens antropogent påverkade värld – och om de processer som styr och samverkar i utvecklingen av jordklotets ”sfärer” d.v.s. geosfären, atmosfären, hydrosfären, kryosfären och biosfären. Vad som bestämmer denna utveckling och reglerar processerna utgörs av fysiska, kemiska och biologiska samband och lagar, varför fysik, kemi och biologi, tillsammans med matematik, utgör oundgängliga stödvetenskaper för geovetenskaperna. För att öka vår kunskap om interaktionerna mellan de olika delarna finns idag en stark trend mot en mer holistisk syn på geovetenskaplig forskning (s.k. ”Earth System Science”). Svensk geovetenskaplig forskning står stark inom ett flertal områden, och bygger till stora delar på omfattande fältstudier. Några exempel är den atmosfärsvetenskapliga, geokemiska, hydrologiska och glaciologiska forskning som bedrivs vid Arktis och Antarktis och delvis i närområdet kring Östersjön. Denna kompletteras av hypotesdriven processinriktad biogeokemisk forskning på molekylär nivå som bygger på avancerad analystekniker. Gemensamt för den geovetenskapliga forskningen är att den oftast är beroende av speciell och kostsam infrastruktur såsom forskningsfartyg, borrhplattformar och mätutrustning, som vanligtvis är finansierad av en rad nationella och internationella källor. För att uppnå långsiktighet och optimalt utnyttjande bör man se över den nationella organisationen för hur denna forskning finansieras, utvärderas och prioriteras.

Kemi har en central roll inom naturvetenskapen. En mer detaljerad kunskap om molekylära skeenden har etablerats under de senaste decennierna, vilket har bidragit till utveckling inom många områden som gränsar

mot kemin. Svensk kemisk forskning har fortfarande en stark ställning både nationellt och internationellt. Två orosmoln finns dock; dels den minskade rekryteringen av studenter till kemiprogrammen vid svenska universitet, dels den förskjutning som sker inom forskningen i kemi mot mer medicinska, biologiska och biotekniska frågeställningar. Detta har bidragit till att kemin kanske mer än något annat ämne inom naturvetenskap har utvecklats från ett ämne med tydlig identitet till ett stödämne inom andra områden såsom molekylärbiologi, materialvetenskap, miljö- och geovetenskap. Alla dessa områden innehåller viktiga delar av kemin, men de betraktas som andra ämnen; kemins breda tillämpbarhet har blivit dess största identitetsproblem. Det är därför viktigt att behålla och utveckla inomvetenskaplig kärnkompetens inom de grundläggande kemiämnena, såsom analytisk, fysikalisk, oorganisk och organisk kemi. Forskningsfinansiering från Vetenskapsrådet spelar i detta sammanhang en mycket viktig roll. För att identifiera brister och eventuella åtgärder kan de ämnesmässiga utvärderingarna som utförs i Vetenskapsrådets regi vara ett bra verktyg. Ett exempel är den utvärdering av oorganisk kemi som gjordes 2008 och som ledde till nya aktiviteter bl.a. skapandet av en aktiv sektion för oorganisk kemi inom Svenska Kemistsamfundet.

---

# MORGONDAGENS UTMANINGAR

---

## Grundforskning och samhällets utmaningar

Vi ser idag, och med all rätt, ett allt tydligare engagemang i mänsklighetens stora utmaningar, och där lyfts forskningen ofta fram som det viktigaste verktyget. Det är till forskningen hoppet ställs om att identifiera möjliga lösningar. Samhället efterfrågar här ofta snabba lösningar baserade på redan existerande kunskap och teknik. Som regel är dock denna kunskapsbas otillräcklig för att lösa många av de stora utmaningarnas problem.

För att anta flera av samhällets stora utmaningar såsom hälsa, miljö- och klimatförändringar, energiförsörjning och hållbart utnyttjande av naturresurser behövs ett brett vetenskapligt perspektiv. Ibland framställs problematiken som så att vi redan besitter nödvändig grundläggande kunskap för att lösa många av problemen associerade med utmaningarna, och det som saknas är utvecklingsarbete och implementering av tekniker och metoder. Stora kunskapsluckor råder alltså vilket begränsar förmågan att förstå vår samtid, förutsäga vår framtid samt att utveckla nya teknologier som gynnar en hållbar samhällsutveckling. Exempelvis behövs ny grundläggande kunskap om små- och storskaliga fysikaliska, kemiska, biologiska och ekologiska processer på Jorden bl.a. för utveckling av tillförlitliga klimatmodeller och för att förstå konsekvenserna av ett förändrat klimat. Likaså krävs ny grundforskning från molekylär till organismnivå för att förstå sjukdomsförlopp och hitta effektiva botemedel. Grundläggande material- och teknikforskning är avgörande för bl.a. lösningar av energiförsörjning och frågor kring utnyttjandet av ändliga naturresurser. Gemensamt för övergripande forskningsfrågor som är kopplade till de stora samhällsutmaningarna är att alla kräver ett brett spektrum av naturvetenskapliga och teknikvetenskapliga kompetenser. Alltså måste vi värna om finansieringssystem som stödjer stark forskning inom samtliga ämnesområden på NT-området för att på bästa sätt kunna möta dagens och morgondagens samhällsutmaningar.

En genomgående utmaning inom teknikvetenskaplig forskning är behovet av *energieffektiva lösningar*. Exempelvis motiveras placeringen av Facebooks datacentraler i Luleå med låga kostnader för kylning och elektricitet. På samma sätt är batteritiden i mobiltelefoner en viktig flaskhals vid utvecklingen av nya mobiltjänster. Exemplet mobiltelefoner illustrerar också att det intressanta måttet inte alltid är total energiåtgång mätt i kWh, utan att hur den fördelas mellan olika enheter, så att ingen blir överhettad eller får slut på batteri. För att hantera utmaningen krävs grundforskning inom en rad områden och tvärvetenskapliga samarbeten. Det är intressant att notera att medan energiforskning traditionellt huvudsakligen handlat om att hitta nya sätt att *producera mer* energi, gäller utmaningen här istället att *konsumera mindre* energi.

## Anställningar och finansieringssystem

Ett växande problem i relationen mellan Vetenskapsrådet och lärosätena är att många tillsvidareanställda lärare är beroende av externa bidrag för finansieringen av sin egen lön. Detta är varken en bra eller långsiktigt hållbar situation. Ansvarsfördelningen bör förtydligas. Kortfristiga externa medel ska inte ligga till grund för tillsvidareanställningar på universiteten. Vetenskapsrådets roll bör istället vara att finansiera doktorander, postdoktorer och driftskostnader. Förändringen måste ske stegvis, men en plan bör snarast upprättas i samråd med departement och lärosäten.

Lärosätena tillsammans med de stora finansörerna måste skapa anställningar för både yngre och etablerade forskare som ger förutsättningar för långsiktig, utmanande och riskbetonad forskning. En rimlig arbetsfördelning är att universitet och högskolor finansierar tjänster medan Vetenskapsrådet och andra finansörer står för projektmedel (drift, doktorander, postdoktorer).

Oklara karriärvägar ger Sverige en klar nackdel i konkurrensen om unga forskartalanger. Otydligheten manifesteras i att anställningsvillkor och tjänstebenenämningar för yngre forskare varierar stort mellan lärosäten och även inom lärosäten. En ung forskare som får en meriteringstjänst måste ges optimala förutsättningar att lyckas. Så är inte alltid fallet idag, på många universitet används meriteringstjänster som projektanställningar, utan långsiktig strategi från arbetsgivarens sida. Detta gör det svårt för svenska forskare att etablera sig och

bygga upp egen forskningsprofil och forskargrupp. Många väljer istället akademiska karriärer i andra länder eller helt andra karriärvägar, till exempel inom näringslivet. Det är också lätt att övergripande ambitioner slår fel. Ett exempel på detta är att flera finansiärer, både i Sverige och inom EU, gör mycket snarlika satsningar, av vilka flera tenderar att tillfalla ett fåtal framstående forskare. Detta gagnar inte forskningens bredd på lång sikt och en koordinering av bidragstyper mellan de olika finansiärerna är önskvärd.

För att täcka framtida rekryteringsbehov behövs för det första bibehållen attraktionskraft för grundläggande utbildningar inom naturvetenskap och teknikvetenskap. För det andra behöver villkoren för forskarkarriären göras så tydliga och attraktiva att alla som har talang och intresse också väljer att söka anställning vid ett svenskt lärosäte. Mobilitet är en viktig grundförutsättning för utbyte av kunskap och idéer på alla nivåer och bör därför premieras.

Beviljandegraderna för fria projektbidrag har nått en mycket låg nivå; i vissa fall ner mot 10 % av totala antalet ansökningar till en viss beredningsgrupp. Detta är delvis en konsekvens av övergången till fyraåriga bidrag i kombination med ett oförändrat antal mindre starka ansökningar. Man bör i detta sammanhang dessutom värdera bidragens användning, särskilt avseende lön till seniora forskare. Rimligt höga beviljandenivåer är viktiga för både Vetenskapsrådets trovärdighet som forskningsfinansiär och som ovärderlig motivation till alla experter från Sverige och utlandet som engageras i beredningsgruppernas arbete. De måste ges förutsättningar att ta ansvar för majoriteten av de bästa ansökningarna, inte enbart ett litet urval där slumpen kan få ett stort spelrum. Utan att föregripa nödvändiga åtgärder, så bör Vetenskapsrådet sträva mot ökad beviljandegrad för fria projektbidrag för att möjliggöra finansiering av projekt med hög kvalitet inom budgetramen för en enskild beredningsgrupp som inte understiger 20 %.

Finansiering av personal som arbetar med drift och utveckling av infrastruktur behöver säkras långsiktigt. Dagens meriteringskrav missgynnar unga forskare som fokuserar på exempelvis detektorutveckling eller programvaru-utveckling, vilket oftast inte ger vetenskapliga publikationer i samma omfattning som annan forskning. Det är viktigt att tjänstestrukturen och meriteringskraven görs flexibla nog att tillgodose en stor bredd av kompetenser inom forskningssystemet.

Som tidigare nämnts leder problemformulering av stora och viktiga forskningsfrågor till en situation där flera traditionella ämnesområden måste samverka för att lösa forskningsuppgiften. Denna trend mot s.k. *unified science* och ett holistiskt angreppssätt påverkar alla ämnesområden inom NT och är i grund och botten positiv. Den stimulerar till samverkan över ämnesgränser vilket ibland kan resultera i att gränser försvinner. I denna process bör man vara uppmärksam på att ämnesidentitet och även inomvetenskaplig kvalitet kan tunnans ut vilket kan få en negativ effekt på den tvärvetenskapliga forskningens långsiktiga kvalitetsutveckling. En stor utmaning är att skapa ett spektrum av finansieringssystem som både stimulerar fördjupning av traditionellt ämnesmässig kompetens och skapar möjligheter för större forskarkonstellationer att anta forskningsfrågor av tvärvetenskaplig karaktär.

## Kvinnliga forskare inom NT-området

Antalet kvinnliga forskare inom NT-området är fortfarande lågt, och ser inte ut att öka i en takt som motsvarar ökningen av kvinnliga studenter på kurser och utbildningsprogram inom området. Framgångsrika kvinnliga forskare och lärare behövs som förebilder för unga kvinnliga studenter som kan inspireras att satsa på en akademisk forskarkarriär. Med de krav som finns på en jämnare könsfördelning inom alla instanser och på alla nivåer så riskerar de få kvinnor som finns i systemet att överutnyttjas för mer administrativa uppdrag med lågt meriteringsvärde. Detta gynnar inte de kvinnliga forskarna, och det borde finnas ett mer konstruktivt sätt att reglera könsfördelningen av administrativa uppdrag och ledningsfunktioner, som i dagens läge har en motsatt effekt än den avsedda på den svenska kvinnliga forskarkåren.

## Infrastruktur

En av de mest genomgripande förändringarna i vetenskapen idag är den som går under benämningen Big data. Datamängder som är flera tiopotenser större än vad som lämpar sig att hantera med traditionella metoder genereras inom exempelvis meteorologi, miljövetenskap, genetik, astronomi och från stora

försöksanläggningar som exempelvis Large Hadron Collider på CERN. Trenden går i samma riktning i den kommersiella sektorn med exempelvis kunddata i sociala medier – för att inte tala om säkerhetstjänsters bevakning av tele- och Internettrafik. Nya metoder för insamling, lagring, överföring, extrahering, visualisering och analys av, liksom sökning i, sådana datamängder är starkt efterfrågade inom alla dessa områden. Detta kräver nya metoder och ny teoribildning inom bland annat datavetenskap, matematisk statistik och beräkningsmatematik. Typisk är dynamiken inom bioinformatik – en löst sammansatt samling redskap för analys av de enorma datamängder som dagens DNA-sekvensering och liknande metoder tillgängliggjort: när utvecklingen gått vidare mot att sekvensera och analysera många individer eller evolutionärt närstående organismer behövs nya algoritmer för att studera genetiska signaturer för exempelvis selektion, adaptation och biodiversitet. De datamängder som behöver analyseras växer så snabbt att till och med den spektakulära exponentiella hårdvaruutveckling som pågått i decennier inte längre hänger med, vilket nödvändiggör tekniker för distribuerad beräkning inklusive så kallad cloud computing, som i sin tur genererar nya utmaningar beträffande exempelvis tillgänglighet, tillförlitlighet och sekretess. Förslaget om att Vetenskapsrådet gör en särskild satsning på e-vetenskap koordinerad mellan ämnesråden och RFI för att utveckla metoder nödvändiga för de forskare som ska använda infrastrukturen är här en viktig komponent för att se till att den kommer till effektiv användning.

I Stockholmsområdet finns de båda forskningsinstituten Nordita (inom teoretisk fysik) och Institut Mittag-Leffler (inom matematik), varav speciellt det senare genom sin unika historia har en internationell särställning. Båda instituten kan ses som viktiga infrastrukturer inom respektive ämne, genom att de fungerar som internationella mötesplatser där forskare och deras idéer kommer i kontakt med varandra. Det är därför viktigt att de får en långsiktigt stabil finansieringssituation.

Inom stora delar av astronomin och fysiken är det helt nödvändigt med tillgång till stora teleskop, acceleratorer och andra försöksanläggningar, något som i många fall förutsätter svenskt medlemskap i ledande internationella samarbetsorganisationer och medverkan i avancerade, ständigt pågående, instrumentutvecklingsprojekt. Exempel är detektorutvecklingsprojekt runt LHC på CERN, neutrino teleskopet ICEcube på Sydpolen, och inom fusionsforskningen har vi JET i Culham i England och ITER-projektet i Cadarache i Frankrike, samt inom astronomin ALMA teleskopet i Chile, satellitprojekt inom rymdfysiken etc. En delvis liknande typ av utveckling krävs för livsvetenskaperna, där högteknologiska mikroskopinoder bör samordnas främst på nationell nivå.

Vissa ämnesråden, såsom delar av geovetenskapen och ekologin, omfattar forskning som är beroende av långa tidsserier. Den sedimentära berggrunden och iskärnor utgör viktiga naturliga arkiv, men ibland behövs också kontinuerliga mätningar över långa tidsperioder och detta utgör en utmaning för forskningsfinansieringssystemen. Det finns etablerade och nya organisatoriska enheter som ska tillfredsställa detta behov (t.ex. ICOS, SITES m.fl.). Det är viktigt att berörda forskningsfinansiärer diskuterar och kommer fram till långsiktiga lösningar som inte bara omfattar fasta installationer utan även forskningsfartyg, etc. Samtidigt är det också viktigt att man genomför oberoende utvärderingar för att säkerställa kvaliteten, och eventuellt förnya eller omprioritera dessa verksamheter.

Ett annat infrastruktururområde där internationellt samarbete är viktigt gäller plats på fartyg, vilket är helt avgörande inom delar av oceanografi och glaciologi. Isbrytaren *Oden* kan väntas fortsätta spela en viktig roll, liksom det stöd som fördelas via Polarforskningssekreteriatet.

Vad gäller medeldyr infrastruktur och utrustning (i prisklassen 0,5 till 10 miljoner kronor) har ansvaret för finansiering av sådan tenderat att hamna mellan stolarna – ett problem som identifierats inom bland annat fysik, biologi och kemi. Då utrustning i den storleksordningen sällan lämpar sig att hantera på nationell nivå behöver universitetet bli bättre på att ta ansvar för och prioritera sådana investeringar.

## Byråkratisering

En annan strukturell fråga är den tilltagande byråkratiseringen av forskningen. Forskningsfinansiärerna har ökat kraven på återrapportering. Den största skillnaden märks dock inom universitetet, där allt fler administrativa funktioner läggs direkt på forskaren, såsom reseräkningar, fakturakontering, personalhantering osv. Detta utgör

en allt större osynlig kostnad (i tid såväl som pengar), och eftersom tendensen är ökande behöver medvetna åtgärder vidtas.

## Kvalitetsproblemet med statistik i empiriska vetenskaper

Vetenskapen idag lider av bristen på statistisk kompetens inom empiriska vetenskaper. Problemet är påtagligt inom de naturvetenskapliga och teknikvetenskapliga fälten (men inskränker sig inte till dessa utan är allvarligt även inom t.ex. medicin och samhällsvetenskaper). En stor andel av alla vetenskapliga arbeten brister i den statistiska slutledningsmetodiken, bland annat till följd av ett allt mer ritualiserat bruk av metoder som forskarna själva inte förstår. De insatser som gjorts för att utbilda framtida forskare i statistisk slutledningsteori behöver fortsätta och intensifieras. Vidare krävs medverkan av statistisk specialistkompetens i den empiriska forskningen. Vetenskapsrådets särskilda satsning *Statistik i empiriska vetenskaper*, med utlysningar 2012 och 2013, utgör ett steg i rätt riktning och bör få en fortsättning. För att hantera problemet behövs en tillämpningsorienterad volymökning i forskarutbildningen i matematisk statistik, och att universiteten öronmärker medel för statistisk internkonsultation.

## Vetenskapens ansvar

I ett dokument som detta hamnar fokus naturligt på hur vetenskapens framsteg kan göra världen bättre, och det implicita värsta fall-scenariot är att forskningen inte leder någon vart eller visar sig irrelevant. Vetenskapen har dock potential inte bara att göra världen bättre, utan den vetenskapliga utvecklingen kan också leda till oerhörda risker. Ett välbekant exempel är kärnvapen.

Hela frågan blir extra komplicerad av att flera av de områden där kanske de allra största riskerna finns – såsom nanoteknologi och syntetisk biologi – också finns med bland dem som potentiellt kan leda till de största förbättringarna. En klok hantering av dessa frågor kräver systematiska studier om olika framväxande teknologiers risker och möjligheter. Detta är inte enkelt men forskarsamhällets ansvar är stort.



---

# INDIVIDUELLA ÄMNESÖVERSIKTER

---

Ämnesrådet för naturvetenskap och teknikvetenskap anlidade skribenter under våren 2014 för att uppdatera och komplettera ”Ämnesöversikter 2010. Ämnesrådet för naturvetenskap och teknikvetenskap”. Ämnesrådet valde att anlita andra skribenter än förra gången för att kunna få med nya perspektiv på forskningsläget.

Ämnesindelningen är snarlik den tidigare.

Skribenterna fick i uppdrag att skriva upp till 10 000 tecken var om sitt ämne, och producera textavsnitt under följande rubriker: *Beskrivning av forskningen inom ämnet, Styrkor och svagheter, Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential, Ämnets ställning i Sverige och internationellt, Särskilda behov av forskningsinfrastruktur*. De ombads belysa följande aspekter av forskningen och dess villkor: *vetenskaplig kvalitet, forskningens genomslag, karriärmöjligheter för forskare, infrastrukturanvändning och -behov, och internationella samarbeten*, samt eventuella andra frågor specifika för området. De texter som lämnades in av skribenterna bearbetades sedan av ämnesrådet, som också skrev de sammanfattande texterna för varje område. Preliminära versioner av ämnesöversikterna var tillgängliga i ett webbforum på Vetenskapsrådets webbplats i augusti-september 2014, där alla forskare hade möjlighet lämna synpunkter. Efter detta gjordes en sista omarbetning av texterna av ämnesrådet, med hänsyn till de kommentarer som kommit in. Den slutliga versionen är ämnesrådets.

## Skribenter

Anders Ahlén, professor, Uppsala universitet  
Bo Albinsson, professor, Chalmers tekniska högskola  
Michael Axelsson, professor, Göteborgs universitet  
Lina Bertling, professor, Kungliga Tekniska högskolan  
Mats Brorsson, professor, Kungliga Tekniska högskolan  
Daniel Conley, professor, Lunds universitet  
Ivica Crnkovic, professor, Mälardalens högskola  
Nils Dencker, professor, Lunds universitet  
Gunilla Efraimsson, professor, Kungliga Tekniska högskolan  
Klas Engvall, professor, Kungliga Tekniska högskolan  
Laszlo Fuchs, professor, Kungliga Tekniska högskolan  
Laine Gutierrez-Farewik, professor, Kungliga Tekniska högskolan  
Per Hammarström, professor, Linköpings universitet  
Hans Hansson, professor, Stockholms universitet  
Hans-Christen Hansson, professor, Stockholms universitet  
Dag Hanstorp, professor, Göteborgs universitet  
Kersti Hermansson, professor, Uppsala universitet  
Thore Husfeldt, professor, Lunds tekniska högskola  
Ola Hössjer, professor, Stockholms universitet  
Kristina Höök, professor, Kungliga tekniska högskolan  
Patric Jannasch, professor, Lunds universitet  
Börje Johansson, professor, Uppsala universitet  
Rolf Johansson, professor, Lunds tekniska högskola  
Mats Jonson, professor, Göteborgs universitet  
Stefan Kröll, professor, Lunds tekniska högskola  
Erik G. Larsson, professor, Linköpings universitet  
Olof Leimar, professor, Stockholms universitet  
Gunnar Lidén, professor, Lunds tekniska högskola  
Kerstin Lindblad-Toh, professor, Uppsala universitet

Svante Linusson, professor, Kungliga Tekniska högskolan  
Garrelt Mellema, professor, Stockholms universitet  
Christina Moberg, professor, Kungliga Tekniska högskolan  
Lars Nyborg, professor, Chalmers tekniska högskola  
Thomas Nyström, professor, Göteborgs universitet  
Anders Oskarsson, professor, Lunds universitet  
Mikael Persson, professor, Chalmers tekniska högskola  
Elisabeth Rachlew, professor, Kungliga Tekniska högskolan  
Kenneth Runesson, professor, Chalmers tekniska högskola  
Per Salberger, professor, Chalmers tekniska högskola  
Stefan Ståhl, professor, Kungliga Tekniska högskolan  
Anna-Karin Tornberg, professor, Kungliga Tekniska högskolan  
Anders Stigebrandt, professor, Göteborgs universitet  
Pentti Tengvall, professor, Göteborgs universitet  
Bo Wahlberg, professor, Kungliga Tekniska högskolan  
Ola Wallberg, docent, Lunds tekniska högskola  
Pär Weihed, professor, Luleå tekniska universitet  
Lars-Erik Wernersson, professor, Lunds tekniska högskola  
Lars Öhrström, professor, Chalmers tekniska högskola

---

# BIOTEKNIK

---

## Övergripande områdesbeskrivning

Forskningen inom bioteknikområdet utgår från molekylära mekanismer i levande celler, från vilka biotekniska verktyg utvecklas. Denna molekylärbiologiska "verktygslåda" används inom såväl grundläggande som tillämpad forskning i medicinsk bioteknik, industriell bioteknik, bioproduktion, växt- och skogsbioteknik, livsmedelsbioteknik, miljöbioteknik, bioenergiproduktion och biomaterialforskning.

Biotekniken genomgår för närvarande en dramatisk utveckling mot en storskalighet i mängden data som genereras, vilket i sin tur medför att forskning och utveckling inom berörda områden accelererar. Dagens bioteknikforskning anses vara central för att lösa de huvudutmaningar som världen står inför idag; hälsa, och en åldrande befolkning, miljö, klimat och hållbar industriutveckling, livsmedelsproduktion och livsmedelskontroll, rent vatten, och en hållbar energiproduktion. Viktiga framsteg har gjorts för att förbättra diagnostiken för individanpassad patientbehandling, utveckla nya läkemedel, främst bioläkemedel, samt inom stamcellsforskning. Andra viktiga områden är ökad effektivisering av processer inom bioproduktion av biotekniska produkter med hjälp av modifierade mikroorganismer, samt bioenergiproduktion som idag fokuseras på produktion av biodiesel och produkter med högt energiinnehåll, med biomassa som råvara. Även inom växt- och skogsbiotekniken och livsmedelsbiotekniken görs stora framsteg.

Den biotekniska forskningen leds idag från USA och Europa, men det är troligt att tyngdpunkten för bioteknisk grund- och tillämpad forskning kommer att förskjutas mot länder som Kina, Sydkorea, Japan, Indien och Singapore. Sverige har en bibehållen stark position internationellt inom bioteknisk forskning med en god balans mellan grundläggande och tillämpad forskning. Framförallt har vi en stark tradition inom metod- och teknikutveckling, med medicinsk bioteknik som ett särskilt starkt tillämpningsområde. Sverige rankas som en av toppnationerna i Europa, både vad gäller publicering av vetenskapliga artiklar, patentering av biotekniska innovationer, nystartande av bioteknikföretag och EU-finansiering till "life science"-sektorn.

En följd av den närmast explosionsartade utvecklingen inom t.ex. genomik, proteomik och bioinformatik gör att biotekniken idag utgör ett område med mycket stort behov av kostsam infrastruktur. Stora strategiska satsningar på nationella resurscenter, möjliggör på ett kostnadseffektivt sätt för forskare från alla svenska lärosäten att ta del av de infrastruktur tunga tekniker som behövs i dagens bioteknikforskning. En ytterligare utmaning är det ökande beroendet av kompetens inom bioinformatik och systembiologi. De snabbt ökande datamängderna inom genomik, proteomik och metabolomik gör integrering och tolkning av dessa stora datamängder allt mer krävande. Det finns behov av spetskompetens men också tillgång till fler bioinformatiker. Forskningen inom områden som klinisk metabolisk engineering, syntetisk biologi och individanpassad diagnostik kan förväntas leda till stora landvinningar, inom dessa områden ställs dock extra höga krav på en etiskt riktig hantering av forskningsresultaten.

## Bioteknik

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Forskningen inom ämnet *bioteknik* utgår från molekylära mekanismer i levande celler från vilka molekylära biotekniska verktyg utvecklats. Denna molekylärbiologiska "verktygslåda" används inom såväl grundläggande som tillämpad forskning inom t.ex. medicinsk bioteknik, industriell bioteknik, bioproduktion, växt- och skogsbioteknik, livsmedelsbioteknik, miljöbioteknik, bioenergiproduktion och biomaterialforskning.

Biotekniken genomgår en dramatisk utveckling mot storskalighet i mängden data som genereras, vilket medför att forskning och utveckling inom berörda områden accelererar. Behovet av tillgänglig infrastruktur och bioinformatiker ökar, vilket medför utmaningar vad gäller forskningsfinansiering.

Om bioteknik definieras utifrån *molekylära* aspekter, utan att ta hänsyn till tillämpningsområden kan ett antal delområden definieras:

- Genomik omfattar sekvensanalys av hela eller delar av arvsmassan från människor, djur, växter eller mikroorganismer. Gener kan studeras med hjälp av helgenomsekvenering, men också genom att identifiera vilka gener som är aktiverade i en viss celltyp. Idag kan man studera samtliga RNA-transkript i en cell, vilket kan avslöja graden av aktivering av gener och ge möjlighet till studier av olika splicevarianter av en gen eller variationer i genskvenser etc. Även studier av epigenetisk genreglering faller inom området. Utvecklingen av kapaciteten hos tillgänglig instrumentering, s.k. next-generation sequencing, har resulterat i en explosionsartad ökning av antalet kartlagda genom men också utveckling av tillämpningar av genomiken i sig. Genomiken har betydelse för kartläggning av nya organismer, jämförelser av närliggande organismer, studier av evolutionär utveckling, populationsgenetik mm. Inom medicinsk forskning utnyttjas genomiken för kartläggning av såväl infektionssjukdomar som genetiska sjukdomar, men också för studier av hur genomet påverkas när en cancer tumör utvecklas. Ett nytt tillämpningsområde är *klinisk genomik*, vilket innebär att sjukhusen till ökande grad vill ha tillgång till genomiska analyser. Inom miljöbiotekniken är det av särskilt intresse att kunna studera hela uppsättningen mikroorganismer inom en viss ekologisk miljö. Denna metagenomik kan användas för att studera miljöpåverkan av olika ekologiska miljöer men också för identifiering av biotekniskt intressanta gener hos organismer som tidigare ej låtit sig studeras. Genomiken har stor betydelse inom grundforskning och tillämpad forskning, och tillämpningarna omfattar vitt skilda områden som t.ex. medicin och miljöbioteknik.
- Proteomik omfattar storskalig analys av proteiner för kartläggning av funktion och lokalisering. I allmänhet avses metodik och tekniker för analys av komplexa provmaterial, som cell- och vävnadspreparat eller plasma- och serumprover. Viktiga teknikplattformar är masspektrometri (MS), affinitetsbaserad proteomik, högupplösande kromatografi och elektrofores, samt utnyttjandet av olika varianter av genfuseringar. Av medicinskt intresse är analys av prover från patientkohorter och biobanker för att identifiera biomarkörer, som dels kan användas för att ge systembiologisk förståelse för sjukdomars utveckling, dels som diagnostiska markörer.
- Metabolomik omfattar mätning och utvärdering av metaboliter som bildas i de kemiska processer som ständigt pågår i biologiska miljöer. Metaboliterna är viktiga för att förstå sjukdomsmekanismer, identifiera biomarkörer för bättre sjukdomsdiagnostik och påverkan av miljön på människan, men också för forskning inom växt- och skogsbioteknik. Kartläggningen av flertalet genom och mer avancerade datamjukvaror har gjort att metabolomikforskningen utvecklats snabbt och är idag en grundsten för olika forskningsområden, inte minst inom medicinen. Viktiga teknikplattformar är MS och NMR kopplat till uni- och multivariat dataanalys.
- Bioimaging omfattar bildgivande metoder och deras användning för analys av biologiskt material. Metoderna innefattar såväl mikroskopi, radiologi och bildgivande masspektrometri. Området är i snabb utveckling både vad gäller instrumentering och dataanalys och spänner från biologisk grundforskning till etablerade medicinska tillämpningar för avbildningsdiagnostik.
- Strukturbiologi kombinerar kompetenser inom molekylärbiologi, biokemi och biofysik för att kartlägga den tredimensionella strukturen hos biologiska makromolekyler, framförallt nukleinsyror och proteiner. Teknikplattformar inkluderar röntgenkristallografi, NMR och olika EM-metoder. Termen strukturgenomik brukar användas vid systematiska ansatser att kartlägga samtliga proteiner inom en viss biologisk miljö.
- "Protein engineering" omfattar tillämpning av genteknikbaserade metoder för att förändra proteiners egenskaper, t ex via utbyte av enskilda eller flera aminosyror, borttagande av hela domäner eller genom fusion till andra proteiner med önskvärda egenskaper. Samlingar av stora antal varianter kan skapas för att via screening eller funktionell selektion identifiera varianter med eftersträlvade egenskaper. Protein engineering används brett inom biotekniken för att t.ex. förbättra enzyms förmåga att fungera i industriella tillämpningar eller för att skapa nya proteinbaserade läkemedel.
- Metabolisk engineering beskriver den process där man genom att förändra genupsättningen i en cell, vanligtvis en mikroorganism, kan få den att producera en viss substans. Detta kan göras genom att utsläcka vissa gener eller införa nya gener från andra värdorganismer. Oftast införs eller förändras gener för metabola enzymer men också för regulatoriska nätverk. Systembiologiska ansatser utnyttjar matematiska modeller för simulering. Det övergripande målet är att kunna använda de resulterande mikroorganismerna för att

producera industriellt värdefulla produkter, idag med fokus på läkemedel, finkemikalier och produkter med högt energiinnehåll som kan utnyttjas som förnybara energikällor.

- Bioinformatik och systembiologi är ett interdisciplinärt område som syftar till att utveckla datorbaserade metoder och mjukvaruverktyg för att inhämta, organisera och analysera biologiska data, så att värdefull biologisk kunskap skapas och tillgängliggörs. Området kombinerar kompetenser inom molekylärbiologi, datavetenskap, statistik och matematik. Bioinformatik inkluderar utveckling och användning av såväl komplexa algoritmer för effektiv hantering och analys av molekylärbiologiska data som visualiseringsverktyg för användarvänlig presentation. Systembiologi syftar till systematiska studier av komplexa samspel i biologiska system för att upptäcka eller utforska nya egenskaper i systemen. Den stora mängd data som genereras gör bioinformatik och systembiologi till en förutsättning för ökad förståelse av centrala biologiska, genetiska, fysiologiska och miljömässiga processer.
- Nanobioteknik definierar gränssnittet mellan nanoteknik och biologi, och syftar till att m.h.a. mikro- och nanofabrikation utveckla miniaturiserade verktyg som kombinerar nanomaterial och mikrofluidik för studier och analyser av olika biologiska miljöer, t.ex. nanobiosensorer. Nanobiotekniken är ett framtidsområde med tillämpningar inom bl.a. medicinsk forskning, samtidigt studeras dock risker med sådana tillämpningar då nanopartiklar i vissa fall visat skadliga effekter.

### Medicinsk bioteknik

En väsentlig del av tillämpningarna av modern bioteknik faller inom den medicinska biotekniken, och flertalet av de verktyg som beskrivits ovan används i denna forskning. Några områden som anses av särskild vikt är:

- Kunskap om folksjukdomar - Framstegen inom den medicinska biotekniken, både vad gäller tillgång på genomisk information och information om funktion och lokalisering av proteiner, kommer att öka förståelsen för uppkomsten av folksjukdomar. Ett viktigt verktyg är tillgången till bra *biobanker*, ett område där stora resurser satsas i Sverige.
- Bioläkemedel eller biologiska läkemedel utgörs av proteiner som t.ex. hormoner, enzymer, blodproteiner och cytokiner, men omfattar även vacciner, allergiprodukter och antikroppar. Ca 30 monoklonala antikroppar är idag registrerade som läkemedel. Nya typer av antikroppsbaseade produkter och affinitetsproteiner framtagna m.h.a. protein engineering närmar sig marknaden. Även genterapier, inklusive antisens-baserade produkter och stamcellsterapi brukar inordnas bland bioläkemedlen.
- Läkemedelsutveckling - Utvecklingen av traditionella läkemedel kan dra stor nytta av den biotekniska forskningens framsteg, t ex vad gäller förståelsen för cellers signalnätverk, identifiering av nya biomarkörer och nya måltavlor, men också för utveckling av nya screeningssystem med biologisk avläsning.
- Individanpassad patientbehandling - En global utmaning idag är att en väsentlig del av vårdkostnaderna går till verkningslösa behandlingar. En snabb utveckling pågår som möjliggör stratifiering av patientgrupper med hjälp av biomarkörer, inklusive proteiner och genetiska markörer. Inom cancerområdet kan avbildningsdiagnostik användas för att studera om en behandling är verksamt. Inom *klinisk genomik* används olika genomikverktyg för analys av individanpassad patientbehandling, både vad gäller genom-sekvensering, och RNA-seq för att studera genaktivering.
- Stamceller - Utveckling mot terapeutiska tillämpningar av stamcellsforskning har gått snabbt efter det att man lyckades omprogrammera hudceller till att bli pluripotenta, d.v.s. kunna ge upphov till alla typer av celler. Tillämpningar av stamcellstekniken faller inom två kategorier av regenerativ medicin, dels framställning, ”odling”, av vävnader, dels för ”mikrotransplantationer” av stamceller för att regenerera skadad vävnad, t ex. hjärtvävnad vid hjärtinfarkt eller hjärnvävnad vid stroke.

### Industriell och miljöinriktad bioteknik

Den industriella biotekniken har mycket breda tillämpningsområden som i mångt och mycket överlappar med miljöbiotekniken varför de här behandlas under samma rubrik. Några viktiga områden är:

- Bioproduktion omfattar forskning och utveckling av cellulära system, vanligtvis bakterier, jäst- eller däggdjursceller, för effektiv produktion av biotekniska produkter och inkluderar såväl bioprosessteknik som kostnadseffektiva storskaliga reningstekniker. Optimering av mikroorganismer och modifierade enzymer för

mer effektiv produktion ingår. Ett brett spektrum av produkter kan produceras som exempelvis enzymer för industriell användning, bioläkemedel för medicinskt bruk, men även bulk- och finkemikalier.

- Enzymatisk produktion, enzymidentifiering och engineering - En tydlig trend inom industriell bioteknik är att ersätta produktion baserad på klassisk organisk syntes med användning av enzymer. Den ökade tillgången på enzymer gör att man kan välja att använda redan etablerade enzymer, screena efter nya enzymer bland organismer från relevant biologisk miljö eller använda protein engineering och riktad evolution för att skapa nya enzymer med önskade egenskaper.
- Metabolisk engineering och syntetisk biologi – Att "skräddarsy" mikroorganismer för bioproduktionsändamål, genom att slå ut och/eller föra in gener för metaboliska enzymer, skapar önskade syntesvägar i de "designade" cellerna. För industriell produktion krävs att dessa celler går att odla i stor skala. Om metodiken används för att bygga upp hela syntesvägar, så benämns området syntetisk biologi.
- Bioenergiproduktion delas in i olika utvecklingsfaser, där den första fasen innebär produktion av bioetanol från stärkelse och socker. Denna fas är etablerad i USA, där sockerrör och majs utgör startmaterial. Nästa utvecklingsfas utgår från restprodukter från livsmedelsproduktion och skogshantering för produktion av bioetanol. Fokus riktas nu mot produktion av biodiesel eller mer optimerade produkter med högt energiinnehåll, med biomassa som råvara. Produktion av bioenergi produkter direkt i fotosyntetiserande alger och bakterier, med koldioxid och vatten som råvaror och solljus som energikälla är också ett mål.
- Växt- och skogsbioteknik omfattar forskning som syftar till utvecklandet av grödor med förbättrade egenskaper för specifika användningsområden. Den tekniska utvecklingen möjliggör riktad växtförädling av i princip alla grödor. I Europa är forskning kring GMO (genetically modified organisms) fortfarande strikt reglerad, men det är viktigt att behålla kunskap och kompetens inom området.
- Livsmedelsbioteknik omfattar såväl utveckling av funktionella livsmedel (ex. probiotika) och livsmedelstillsatser, som screening och utveckling av mikroorganismer och enzymer för livsmedelsindustrin.

## Styrkor och svagheter

Sverige har en lång och framgångsrik tradition inom bioteknisk forskning, framförallt en stark tradition inom metod- och teknikutveckling. Generellt bör man kunna hävda att Sverige behåller sin ytterst framskjutna position vad det gäller bioteknisk forskning med medicinsk bioteknik som ett särskilt starkt tillämpningsområde.

En svaghet som är förknippad med att Sverige är ett litet land är att expertis och infrastruktur inte kan byggas upp på alla universitet. SciLifeLab har nationellt ansvar som resurscenter inom utvalda teknikområden, och möjliggör för forskare från alla lärosäten att ta del av infrastrukturen som tillhandahålls. En annan svaghet är att Sverige saknar stora framgångsrika bioteknikföretag.

En stor utmaning är att kontinuerlig finansiering behövs för att upprätthålla den internationella konkurrenskraften. En ytterligare utmaning är det ökande beroendet av kompetens inom bioinformatik och systembiologi. De snabbt ökande datamängderna inom ramen för genomik, proteomik och metabolomik gör integrering och tolkning av dessa stora datamängder allt mer krävande. Det finns behov av spetskompetens men också tillgång till fler bioinformatiker.

Inom växt- och skogsbioteknikområdet riskerar Europa att förlora konkurrenskraft gentemot USA. "Enzyme discovery och engineering" är områden där Sverige inte tydligt utmärker sig, även om det finns ett fåtal starka mindre forskningsmiljöer.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Biotekniken genomgår för närvarande en dramatisk utveckling vilket accelererar forskning och utveckling inom relaterade områden. Kartläggning av den mänskliga arvsmassan är idag både betydligt snabbare och billigare vilket medför att genomikforskningen tar klivet in på nya områden. Området *klinisk genomik*, alltså att från sjukhusen efterfråga storskaliga genetiska analyser, torde etablera sig inom kort. Det spekuleras om att helgenomkartläggning av samtliga cancertumörer för samtliga patienter kan bli verklighet inom något decennium.

En annan tydlig trend är behovet av att flytta kostnader från behandling till tidig diagnostik. Utvecklingen mot individanpassad terapi möjliggörs av bioteknisk forskning kring diagnostik baserad på proteiner och genetiska markörer. En besläktad trend är utveckling av mer effektiva metoder för att följa hur en behandling verkar, t ex. avbildningsdiagnostik för kontroll av cancertumörers svar på behandling, så att man snabbt kan byta behandling om resistens uppstår.

Ett tillämpningsområde med stark utvecklingspotential torde vara metabolisk engineering av mikroorganismer (t.ex. fotosyntetiserande alger och bakterier) som kan producera kolväten med högt energiinnehåll för att ersätta behovet av fossila bränslen. Målet är att designa mikroorganismer som endast utnyttjar koldioxid, vatten som råvaror och solljus som energikälla.

Forskningen inom områden som klinisk metabolisk engineering, syntetisk biologi och individanpassad diagnostik kan förväntas leda till stora landvinningar, men för att dessa ska komma till gagn ställs extra höga krav på en etiskt riktig hantering av forskningsresultaten.

Sverige har en bibehållen stark position internationellt inom bioteknisk forskning, och vi har en god balans mellan grundläggande och tillämpad forskning. Det har gjorts kraftsamlingar för att tackla det ökande behovet av infrastruktur, samtidigt som vi behåller finansiering av hypotesdriven projekt driven forskning. Detta torde skapa en stark grogrund för fortsatt utveckling inom svensk bioteknisk forskning med utvecklingspotential för framtiden.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Sveriges position inom bioteknisk forskning står sig mycket väl internationellt, vad gäller publicering av vetenskapliga artiklar, patentering av biotekniska innovationer, nystartande av bioteknikföretag, och även EU-finansiering.

Den biotekniska forskningen leds idag från USA och Europa, men det är inte osannolikt att tyngdpunkten för bioteknisk grund- och tillämpad forskning kommer att förskjutas mot Kina, Sydkorea, Japan, Indien och Singapore. För att Sverige ska behålla sin position och vara en attraktiv samarbetspartner måste dessa samarbeten baseras på en inomvetenskaplig styrka, varför det är viktigt att fokusera på spetskompetens.

## Särskilt behov av forskningsinfrastruktur

Den närmast explosionsartade utvecklingen inom t.ex. genomik, proteomik och bioinformatik gör att biotekniken idag är ett område med mycket stort behov av kostsam infrastruktur. För att behålla vår position som ledande forskningsnation krävs ständiga nyinvesteringar då "livstiden" för mycket av den moderna instrumenteringen knappt når den femåriga avskrivningstiden. Stora strategiska satsningar som stödjer nationella infrastrukturer specialiserade på att erbjuda kompetens och anpassad service och stöd torde vara kloka investeringar för ett litet land som Sverige, då det på ett kostnadseffektivt sätt möjliggör för svenska forskare att ta del av infrastrukturen. Inom bioimaging och strukturbiologi är tillgång till synkrotronljusbaserade källor essentiell, här blir MAX IV en viktig resurs.

---

# BIOVETENSKAPER

---

## Övergripande områdesbeskrivning

Biovetenskaperna omfattar studier av livet på olika nivåer: från enskilda biomolekyler till levande celler, hela organismer, populationer, arter och ekosystem. Forskningen står idag inför många utmaningar, som spänner över behoven av ny kunskap för att bättre förstå effekterna av miljöförändringar på kort sikt (ekologisk tidsskala) och på lång sikt (evolutionär tidsskala). För att tillgodose dessa behov krävs tillämpning av nya avancerade tekniska och matematiska metoder. Användandet av nya metoder ger i sin tur upphov till utmanande mängder data, som assimilerade har potential att leda till banbrytande insikter om grundläggande genetiska och cellulära mekanismer vilka är av stor relevans för mänskliga system och sjukdomar.

Den ökade tillämpningen av avancerade tekniker inom biovetenskaplig forskning har resulterat i en närmare integration med andra forskningsområden, som t.ex. kemi, fysik och teknikvetenskap samt medicin. Idag har svensk biovetenskaplig forskning en stark internationell ställning med ett stort antal forskargrupper som är världsledande inom sina forskningsområden. Områden där svenska biovetenskaplig forskning har haft särskilt stark framgång inkluderar cellbiologi, mikrobiologi, tumörbiologi, patologi, immunologi, stamcells forskning, biologisk avbildning, utvecklingsbiologi, evolutionsbiologi, organismbiologi och ekologi. Många av dessa områden använder nu genetiska och bioinformatiska metoder där, "-omiktekniker" och analys spelar en dominerande roll för att studera biologiska frågor. De resulterande behoven av bioinformatisk kompetens, med betoning på effektiva biologiska gränssnitt, är ännu inte realiserade och utgör en betydande utmaning för att säkerställa framtida framgångar inom biovetenskaplig forskning i Sverige. En stor utmaning under de närmaste kommande åren blir därför att på ett så effektivt sätt som möjligt balansera ett fortsatt kompetent "high-end" infrastrukturstöd med andra behov av finansiering i det svenska forskarsamhället.

Svensk biovetenskaplig forskning har stark potential att förbli internationellt framgångsrik och bli världsledande inom ännu fler områden än idag, men det finns många kritiska utmaningar som måste hanteras och fallgropar som bör undvikas. Även om det är viktigt att fortsätta rekryteringen av begåvade unga forskare och ge dem möjlighet att bygga upp levande forskningsmiljöer, måste den svenska forskningen inriktas på att ge kontinuerligt och långsiktigt stöd till forskare som utför "praktiska detaljer" eller hypotesdriven biologisk forskning som spänner över alla skeden i karriären. Fortsatt minskad andel beviljade projektbidrag utgör därför ett hinder för att i framtiden kunna utveckla en ny och fortsatt ledande nationell och transnationell forskning inom området. Ett ökat stöd till sådana projekt skulle befästa och stärka Sveriges position inom biovetenskaplig forskning och utveckling.

## Cell- och molekyllärbologi

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Disciplinen cell- och molekyllärbologi undersöker hur levande organismer fungerar på molekylär och cellulär nivå. Här undersöks funktioner och konsekvenser av cellulära och molekyllära processer från atom nivå upp till hela organismers evolution. De verktyg som utvecklats inom molekyllärbologin lånar ofta idéer från genetik, biokemi, och biofysik och dessa tekniker begagnas även flitigt inom den moderna evolutionsbiologin och ekologin vilket gör gränsdragningar mellan olika discipliner något flytande. Cell- och molekyllärbologin vill belysa de molekyllära funktioner, processer och strukturer som ligger till grund för olika organismers tillväxt, reproduktion, utveckling, överlevnad och åldrande. Inom ämnet ingår även molekyllära/cellulära studier kring kommunikation och signalering, kognition, och sjukdomsförlopp. I realiteten är det dock endast ett begränsat antal organismer som studerats på en djupare, molekylär, nivå av den orsaken att olika organismer har visat sig mer eller mindre lämpade för de tekniker, främst genetiska och biokemiska, som krävs. De mest välstuderade organismerna (så kallade modellorganismer) inkluderar förutom humana cellkulturer, bakterien *Escherichia*



*coli*, jästen *Saccharomyces cerevisiae*, växten *Arabidopsis thaliana*, nematoden *Caenorhabditis elegans*, flugan *Drosophila melanogaster*, musen *Mus musculus*, och bland fiskar, zebrafisken *Danio rerio*.

Idag ingår också storskalig databehandling i cell och molekylärbiologin, samt pågående utveckling av nya mjuk- och hårdvaror inom bioinformatiken för analys av gigantiska databaser. Dessutom har framsteg inom de så kallade genom-vida teknikerna gjort det möjligt att samtidigt studera multipla geners och proteiners expression/produktion och växelverkan. Det ska dock sägas att det hypotesdrivna, reduktionistiska, angreppssättet fortfarande är disciplinens stöttele.

## Styrkor och svagheter

Grundläggande cell- och molekylärbiologisk forskning har starka traditioner i Sverige och precis som i resten av Europa, har även epi-genetiken - främst i anknytning till tumörbiologi - och systembiologin gjort ytterligare landvinningar.

Den tidigare uppmärksammade trenden emot en ökad fokusering på ”användbarhet” i dessa forskningsområden kvarstår, vilket inom tumörbiologin är naturligt och eftersträvänsvärd. Av allt att döma är emellertid fokuseringen mot användbarhet inte ett resultat av att de enskilda forskarna upplevt ett ökat behov av detta, utan av att forskningsfinansiärer i ökad omfattning betonat användbarhetens betydelse. Dessutom har den senare tidens stora anslag till omfångsrika forskargrups-nätverk i stor utsträckning varit riktade mot tekniska eller medicinska projekt med tydligt applicerbar inriktning. Det finns en stor risk med denna trend då den missgynnar nyfikenhetsdrivna grundforskningen, vilken allt som oftast står för de stora genomgripande genombrotten, för stå tillbaka. Det finns tydliga tecken på att detta redan är en realitet i Sverige: Den grundvetenskapliga molekylära, biokemiska och genetiska forskningen kring t.ex. bakteriella modellsystem, *E. coli* och *Bacillus subtilis*, har traditionellt varit mycket stark i Sverige men har nästan helt ersatts av mer ”applicerbara” projekt. Detta är olyckligt mot bakgrund av att de nyligen utvecklade genom-vida teknikerna nu gör det möjligt att penetrera grundläggande bakteriell fysiologi på ett helt annan djup än tidigare, vilket i sin tur möjliggör nya angreppssätt inom t.ex. antibiotikaresistens-problematiken.

Ett faktum som vid första anblicken förefaller signalera en nedgående konkurrenskraft inom svensk cell- och molekylärbiologi är den relativt blygsamma förmågan hos svenska doktorer att erhålla postdoktorala anslag från ”Human Frontier” och EMBO. Orsaken till denna trend kan dock till vis del tillskrivas olika nationers policy (krav) gällande vetenskaplig publicering (antal och kvalitet) under doktorandens utbildning. Inom de flesta Europeiska institutioner med inriktning mot cell- och molekylärbiologi ”destilleras” numera doktorandens arbete till en, i vissa fall två, vetenskapliga publikationer med betydande genomslagskraft som produceras mot doktorandperiodens slut. Dessa arbeten utgör av naturliga skäl inte alltid vetenskapliga genombrott men är oftast mycket kompletta och gedigna arbeten som har en tendens att hamna i väl ansedda tidskrifter. Av orsaker som inte är helt uppenbara verkar många svenska institutioner (i likhet med finska) ha en oskriven regel om åtminstone tre till fyra publikationer (manuskript) för en avhandling inom cell- och molekylärbiologi. Detta ligger svenska doktorer i fatet eftersom deras publikationsprofil ofta upplevs som ”plottrig” och att doktorandarbetets potentiella genomslag späds ut i mindre uppmärksammade publikationer.

Ett problem som kvarstår sedan tidigare är avsaknaden av en tydlig karriärstege för yngre forskare och bidrag som tillåter en uppbyggnad av den egna forskningsprofilen/gruppen. Generellt är bidragen från Vetenskapsrådet och Cancerfonden alltför små för att yngre (även etablerade) forskare ska kunna få en önskvärd och konkurrenskraftig utväxling på sina projekt. Detta får till följd att svenska forskare inom cell- och molekylärbiologi spenderar allt för mycket tid på att söka anslag från allehanda anslagsgivare och stiftelser. Även om nya anslagsformer och aktörer (ERC, KAWS/KVA) har tillkommit för att stödja excellenta yngre forskare saknas generellt resurser och en genomgripande policy/infrastruktur för att trygga våra lärosätens återväxt i, och upprätthållande av, cell- och molekylärbiologisk forskning.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Som nämnts tidigare vilar vår kunskap om cellulära och biologiska processer på forskningresultat som erhållits med ett relativt begränsat antal modellorganismer. En expansion av denna repertoar förväntas ge nya och

betydelsefulla upptäckter för vår förståelse för livsprocesser och sjukdomstillstånd. Det fanns en förhoppning om att inhibitorisk RNA-teknik (siRNA) där gener kan stängas av med riktade RNA-sekvenser skulle bidra till en sådan expansion, men tekniken har i realiteten mest används, av praktiska skäl, i etablerade modellorganismer. Upptäckten av en bakteriell, genetisk mikrokirurgi via CRISPR/Cas9-systemet har gett upphov till nya förhoppningar om att etablera nya modellorganismer där arvsmassan kan skräddarsys i olika typer av celler, inklusive mänskliga. Global genetisk interaktionsanalys via ”synthetic genetic array technology” har hittills bara varit genomförbar i jäst (*S. cerevisiae*) och bakterier (*E. coli*) men försök med CRISPR/Cas9-systemet har redan påbörjats för att tillåta denna typ av analys i andra organismer, exempelvis patogena och antibiotika-resistenta, Gram-positiva bakterier. Metodens utvecklingspotential är redan mycket uppmärksammas.

En ny och viktig teknikutveckling inom ämnet är superupplösande mikroskopi (t.ex. SIM, STED och PALM) som kan sägas nå en upplösning någonstans emellan klassisk ljus-mikroskopi och elektron-mikroskopi men som har den fördelen att den i många fall kan detektera samma typ av fluorescerande reportage-proteiner (GFP m.fl.) som i standard fluorescens-mikroskopi. Det finns en pågående utveckling av tekniken som ämnar möjliggöra studier av tids-upplösta dynamiska förlopp (t.ex. protein-protein interaktioner) i nanometerskala utförda på levande celler eller vävnader. Superupplösande mikroskop kommer att få en ökad betydelse inom både den klassiska cellbiologin och molekylärbiologin. En annan ny och spännande avbildningsteknik, CLARITY, kommer med all sannolikhet påverka utvecklingen inom framförallt neurobiologi.

En intressant tendens är en ökad förståelse från finansierarnas sida för betydelsen av originalitet, idéer och enskilda forskargrupper snarare än stora forskar-nätverk. Flera aktörer, som t.ex. KAWS, KVA, Cancerfonden, ERC har uppmärksammat betydelsen av excellent, nyfikenhetsdrivengrundforskning utan vidare kringvillkor och har varnat för att ”strategiska satsningar”, där vissa forskningsinriktningar, användningsområden och stora nätverk prioriteras begränsar möjligheterna till originell och nyskapande grundforskning. Ytterligare satsningar åt det här individ-baserade hållet vore önskvärt också på lärosätes- och forskningsråds-nivå för att säkerställa en kontinuitet inom högkvalitativ forskning och för att motverka flytt av framstående svenska forskare till andra länder.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Cell- och molekylärbiologi har en framträdande nyckelroll inom både biologisk och medicinsk forskning internationellt. Den har genomgått, och genomgår ständigt, stora förändringar mot mer sofistikerade tekniker och dessa tekniker ger i sin tur upphov till nya frågeställningar. Sverige har, mot bakgrund av sin storlek och ringa finansiella satsning på området, följt med bra i denna utveckling men intar inte en ledande roll i ämnets generella framåtskridande eller teknikutveckling. Däremot kan sägas att Sverige är starkt inom specifika delområden där det finns starka enskilda forskargrupper med originella frågeställningar - flera av dessa grupper uppnår en världsledande ställning. Dessa områden utgör ingen enhetlig disciplin inom cell- och molekylärbiologin utan är snarare en återspeglning av enskilda forskares kompetens och intresse. Detta är ett viktigt faktum att beakta för forskningspolitiken.

De tekniker och analyser inom ämnet som på senare tid möjliggjort systembiologiska, genom-vida, studier av exempelvis genetiska interaktioner (”Synthetic Genetic Array analysis”), translation (”Ribosome Profiling”), och storskalig och supersnabb cellulär avbildning (”High-Content-Microscopy”) har främst gjorts i USA och Kanada. Denna teknikutveckling har möjliggjort analyser kring hur gener växelverkar med varandra i komplexa nätverk och hur perturbationer i nätverkens noder påverkar en organisms fenotyp, molekylära kompensationer, mottaglighet för stress, sjukdomar och åldrande m.m. Sverige, och Europa i övrigt, ligger generellt efter inom dessa områden även om högkvalitativ forskning och teknikutveckling förekommer. Däremot är svensk forskning kring införlivandet av mikrofluidik och nanoteknologi med moderna avbildningstekniker framstående.

## Särskilda behov av forskningsinfrastrukturer

Behoven av infrastruktur och gemensamma faciliteter för avancerad cell- och molekylärbiologisk analys kan inte jämföras, som ibland görs, med behoven inom fysik av t.ex. partikel-acceleratorer. Det är relativt få analysutrustningar inom cell- och molekylärbiologi som med fördel kan anskaffas och placeras i en centraliserad, nationell "core-facilitet" (MAX IV-laboratoriet utgör ett undantag för molekylärbiologer i gränsområdet mot strukturbiofysik). Beslut om eventuell anskaffning och uppbyggnad av centraliserade faciliteter bör därför diskuteras med utgångspunkt från den enskilda tekniken i fråga och om den behöver de enskilda forskarnas närvaro. Ett belysande exempel är den nya superupplösnings-mikroskopin (precis som elektronmikroskopi och supersnabb "high-content-microscopy") som redan etablerats på flera svenska lärosäten eftersom den oftast kräver ett intimt samarbete mellan mikroskopister och experimentalister, speciellt om analys av tidsupplösta förlopp i levande celler studeras. Däremot kan det finnas fördelar med centrala faciliteter för t.ex. helgenomsekvensering (NGI) samt mikro- och nanofabrikationer (Myfab) då dessa tekniker i allmänhet inte kräver fortlöpande kontakt mellan facilitet och avnämare. En viktig aspekt som dock bör utredas är i vad mån de nationella faciliteterna är kostnadseffektiva eller om utländska aktörer erbjuder samma service till lägre pris.

## Ekologi

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Ekologin beskriver hur organismer påverkas av sin fysiska omgivning och av andra organismer. Inom ekologin studeras effekter av sådana interaktioner på evolution av egenskaper, organismers antal och utbredning, och på biogeokemiska processer. Ekologin har utvecklats mycket starkt under de senaste decennierna och vuxit både i volym och ämnesbredd. Utvecklingen har drivits fram dels av en stark inomvetenskaplig strävan att förstå ekologiska interaktioner och genom ett utnyttjande av nya metoder från angränsande fält, dels av att samhället i allt större utsträckning efterfrågat ekologisk kunskap för att förstå och motverka de problem som uppstått som ett resultat av den påverkan mänsklig aktivitet utövar på biosfären. Denna ekologiska forskning handlar till exempel om betydelsen av förlust av habitat och biologisk mångfald samt om följder av klimatförändringar.

Ekologins utveckling har inneburit ett starkare inslag av ämnesövergripande problemställningar med koppling till andra naturvetenskapliga områden men också till ekonomi och samhällsvetenskap. Strävan att bättre förstå mekanismerna bakom ekologiska interaktioner har bland annat lett till starka kopplingar till molekylära processer, genetik och fysiologi, medan ambitionen att studera processer över större rums- och tidsskalor knyter an till bland annat kemi, meteorologi, systematik och naturgeografi. Inom funktionell ekologi och migrations- och sinnesekologi finns starka kopplingar till teknikvetenskap, och teknikutveckling har haft stor betydelse. Sammantaget har denna utveckling inneburit att ekologin idag är ett mycket brett och mångformigt forskningsfält.

### Styrkor och svagheter

Ämnesmässigt avspeglar svensk ekologi relativt väl den internationella situationen. Svenska forskare har ett brett samarbete, ofta med världsledande grupper, och ämnet är förhållandevis starkt i ett internationellt perspektiv. Det är därför svårt att peka på forskningsfält inom ekologin som är direkt svaga i Sverige jämfört med den internationella utvecklingen. Möjligen kan det vara så att svensk ekologi inte har haft samma dynamiska samspel mellan teoretisk och empirisk forskning som varit fallet i de allra starkaste internationella forskningsmiljöerna, som finns i USA och Storbritannien, men även i länder som Nederländerna och Schweiz. Det finns internationellt sett framstående grupper och individer inom teoretisk ekologi vid flera svenska universitet, men stora delar av svensk ekologisk forskning har en relativt svag teoretisk förankring. Svensk ekologi skulle därför gynnas av ett starkare teoretiskt innehåll och framför allt av en starkare integration mellan teoretiskt och empiriskt inriktad forskning.

Många starka forskargrupper finns inom evolutionär ekologi. Även ekologisk genetik och mikrobiologisk ekologi har utvecklats starkt genom utnyttjande av nya metoder, och det gäller också funktionell ekologi i gränsområdet mot fysik. Forskning kring proximala förklaringsmodeller för ekologiska interaktioner utvecklas starkt och integreras med mer traditionella angreppssätt där ultimata orsakssammanhang studeras. Även studiet av ekologiska processer över stora tids- och rumsskalor är förhållandevis starkt. Forskning med inriktning på att studera människans påverkan på naturen, bevarande och förvaltning av arter och samhällen, samt miljöförändringars betydelse för biologisk mångfald och ekosystemprocesser är för närvarande en viktig del av svensk ekologi.

Den svenska ekologins förutsättningar att ytterligare stärka sin vetenskapliga ställning är goda. Den starka framväxten av ekologisk forskning har ekonomiskt framför allt möjliggjorts genom en diversifierad och forskarstyrd finansiering. En annan framgångsfaktor är det täta samarbetet med internationellt ledande forskare och grupper, ofta grundlagt under postdoktorala utlandsvistelser. Den enskilt viktigaste faktorn för att svensk ekologi på längre sikt ska kunna utnyttja de gynnsamma förutsättningarna och utvecklas framgångsrikt är en fortsatt och ökad forskarstyrd finansiering via forskningsråden. Ett hot mot en sådan framgångsrik utveckling är en alltför avnämard styrd forskning, genom exempelvis strategiska satsningar och beställningsforskning, som ger en alltför kraftig inverkan av nationellt färgade problem och belöningsystem. En viktig aspekt är att uppnå bredd i finansieringen och att rekryteringen av yngre forskare och forskargrupper underlättas, samtidigt som en väsentlig del av resurserna kanaliseras till redan etablerade grupper. En väl avvägd balans mellan att unga forskare ges möjlighet att på egna meriter få betydande finansiering, och därmed ett oberoende, och att redan etablerade och starka forskare och forskargrupper har möjlighet till fortsatt stöd är avgörande för långsiktig framgång. Situationen för svensk ekologi är förhållandevis god i detta avseende, men en viss tendens mot styrda satsningar finns dock. Det är viktigt att dessa inte får spela en alltför stor roll, utan att bredd, styrka och dynamik i stället upprätthålls.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Ekologin tillhör de områden inom biologin som internationellt utvecklats starkt under de senaste tio åren. Detta gäller såväl grundläggande som tillämpade fält och har möjliggjorts genom utveckling av både teori och nya metoder. Insikten om betydelsen av temporal och rumslig variation i interaktioners styrka för populations- och samhällsdynamik har ökat, liksom förståelsen av hur interna mekanismer och yttre faktorer tillsammans påverkar evolution i naturliga populationer. Det finns inga tecken på att ekologins starka utveckling kommer att mattas av inom överskådlig framtid; aktivitetsnivån och utvecklingshastigheten är fortsatt hög såväl i Sverige som internationellt. Med tanke på den accelererande miljöförändringen är det också rimligt att behovet av tillämpningar av ekologisk kunskap under de närmaste åren kommer att öka ytterligare.

Evolutionär ekologi är och kommer sannolikt att fortsätta vara ett av de centrala forskningsfälten inom ekologin i Sverige. Många av de starkaste forskargrupperna finns inom detta fält och särskilt starka svenska forskningsområden är migration, funktionell ekologi, evolutionsbiologi, livshistorieekologi, beteendekologi, sexuell selektion, könkonflikter, evolution av anpassningar, artbildning, sjukdomar och immunsystems mekanismer och effekter, samt interaktioner mellan djur och växter.

Utvecklingen av nya metoder, inom bland annat molekylär genetik, har ändrat förutsättningarna dramatiskt för många områden inom ekologin och lett till en ökad förståelse av den molekylära bakgrunden till ekologiska interaktioner och hur evolution sker i samspel mellan det genetiska systemet och ekologiska processer. Sverige har följt med mycket bra i denna utveckling och flera starka forskargrupper finns inom området ekologisk genetik. Även mikrobiologisk ekologi har under senaste åren haft en mycket snabb utveckling på grund av införandet av nya molekylära metoder. I Sverige finns starka forskargrupper inom detta fält som studerar system i både mark och vatten. Även i gränsområdet mellan ekologi och kemi finns starka svenska forskargrupper. Det är sannolikt att vi kommer se en fortsatt snabb teknikutveckling för att klarlägga proximala mekanismer och en ökad integration av molekylära med mer traditionella metoder, till exempel för att kunna länka molekylära processer till selektion, populationsdynamik och miljö. Inom migrationsekologin har teknisk utveckling inom mätteknik, mikroelektronik, nanoteknik och molekylärgenetik bidragit till den gynnsamma

utvecklingen av fältet. Slutligen har forskning om populations- och samhällsdynamik internationellt utvecklats mycket starkt, och svensk ekologi är en del av denna trend.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Generellt sett är ekologi ett mycket starkt forskningsområde i Sverige med flera internationellt ledande forskare. Svenska ekologer publicerar i högt ansedda tidskrifter, citeras ofta och får generellt mycket goda omdömen i internationella utvärderingar. I jämförelse med de nordiska grannländerna är svensk ekologi klart konkurrenskraftig, och den står sig också bra i jämförelse med starka europeiska forskningsländer som Nederländerna och Schweiz. Vad gäller utvecklingen av internationell publicering kan man se en trend i Sverige mot en ökad betoning på evolutionär ekologi, medan i andra jämförbara länder så har ekologins olika delar expanderat mer jämnt.

Även i en jämförelse med andra forskningsfält i Sverige är ekologins ställning stark. Detta är inte i första hand ett resultat av framgångar inom enstaka delområden eller av enstaka forskargrupper, utan av att Sverige har ett antal forskargrupper som ligger i den internationella forskningsfronten inom sina respektive fält. Detta innebär att en fortsatt framgångsrik utveckling för ekologin, både från ett inomvetenskapligt perspektiv och från de behov som människans påverkan på miljön skapar, måste bygga på en stark utveckling inom många olika subdiscipliner.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Ekologisk forskning har traditionellt inte gjort stora anspråk på infrastruktur. För en fortsatt framgångsrik utveckling av ekologin framstår dock några infrastrukturella satsningar som särskilt angelägna. Det kan vara lämpligt att satsningar görs på en europeisk, eller åtminstone nordisk, nivå.

Både utifrån ekologins inomvetenskapliga strävan att förstå processer från individ till ekosystemnivå över stora tids- och rumsskalor, och för att följa människans påverkan på dessa system, finns det ett stort behov av att samla in och analysera data över längre tidsperioder. Det är också så att flera genombrott inom ekologin har byggts på experiment i betydligt större rumslig skala och över betydligt längre tidsperioder än traditionella laboratorie- och fältexperiment. Långsiktig datainsamling och storskaliga experimentella manipulationer kräver både tillgång till skyddade naturområden och nödvändig infrastruktur för provtagning, analys och experiment. Sådana förutsättningar kan genom långsiktig finansiering skapas och upprätthållas vid några av våra befintliga marina, limniska och terrestra forskningsstationer. Det finns redan en början till detta, till exempel Svenska LTER (*Long-Term Ecological Research*), svenska LIFEWATCH och SITES (*Swedish Infrastructure for Ecosystem Science*), liksom Svenska Fenologinätverket (SWE-NPN) och Artportalen/ArtDatabanken. För att sådana satsningar ska lyckas är det dock avgörande att man genomför förutsättningslösa utvärderingar av vad de i själva verket levererar i form av data och vetenskapliga resultat, och vid behov förnyar eller förändrar satsningarna.

Det är också viktigt att understryka att ekologin under de senaste årens snabba metodutveckling kommit att bli alltmer beroende av högteknologiska instrument, inte minst genom forskning i gränsområdena mot molekylärbiologi, genetik, kemi, fysik m.m. Med all sannolikhet kommer denna snabba utveckling att fortsätta och därmed även ekologins behov av dyrbar instrumentering. Även om det är svårt att specificera vilken typ av instrument som kommer att behövas framöver, så är det viktigt att möjligheterna att söka medel för denna typ av infrastrukturella satsningar bibehålls. Inom ekologisk forskning samlas ofta stora datamängder in som relateras till omvärldsdata och behovet av e-infrastruktur för samordning och bearbetning av data kommer därför även i framtiden att vara stort.

# Genetik och systematik samt bioinformatik

## Beskrivning av forskningen inom ämnet

Genetik är ett brett forskningsämne, som innefattar både beskrivning av de komponenter som bygger upp arvsanlagen (kromosomer och gener) och förståelse för de mekanismer som reglerar dessa komponenter, samt studien av kopplingar mellan genotyp och fenotyp. Inom populationsgenetik studeras hur populationers genetiska sammansättning förändras i tid och rum, och vilka evolutionära mekanismer som ligger bakom sådana förändringar. Molekylär ekologi och molekylärbiologi dominerar den moderna genetiken med studier på DNA-/RNA-nivå av ekologiska och biologiska fenomen. Med avancerad DNA-analys teknik kartläggs nu arters och individers hela genom, och forskning på denna nivå benämns genomik (med inriktningarna mot funktionsgenomik, evolutionär genomik, ekologisk genomik, fylogenomik och populationsgenomik).

Genomikforskning var tills nyligen begränsat till ett fåtal modellorganismer, men är idag i princip tillgänglig för alla arter. Mycket arbete har gått åt till att förbättra metoderna för analys av komplexa arvsmassor, men en hel del arbete återstår. Organismer med en kartlagd arvs massa har därför stora fördelar när det man studerar t.ex. populationsgenetik eller kopplingar mellan genotyp och fenotyp.

Systematik studerar och analyserar organismers utbredning (biogeografi), evolutionära släktskap (fylogeni), beskriver och namnger arter (taxonomi), och klassificerar arter på ett sätt som speglar deras fylogeni. Systematisk forskning har beröringspunkter med ekologi, populationsgenetik, utvecklingsbiologi. Modern systematisk forskning är baserad på molekylära data vilket har öppnat för helt nya frågeställningar. Därmed har systematik närmast sig evolutionär biologi, bioinformatik, statistik och adresserar generella frågeställningar om artbildning, populationsdifferentiering och genetik.

Bioinformatik är kombinationen av statistik och datavetenskap tillämpat på biologiska data. Bioinformatiken har utvecklats som ett nödvändigt redskap för att kunna analysera de mycket stora datamängder som genereras med dagens DNA sekvenseringsmetoder. Viktiga komponenter är framtagning av algoritmer för montering och annotering av genom, jämförande analys mellan sekvenser och etableringen av centrala databaser för ökad tillgänglighet. När möjligheterna att sekvensera och analysera många individer per art eller evolutionärt närliggande organismer ökar, ökar även efterfrågan på algoritmer till att studera genetiska signaturer för t.ex. selektion, adaptation, biodiversitet och populationsmönster.

Bioinformatiken har på senare tid breddats för att inkludera mer matematik i det som idag går under samlingsnamnet systembiologi, där man konstruerar matematiska beskrivningar av cellulära system och fysiologiska processer baserade på multipla och komplexa datatyper. Som framgår av ämnesbeskrivningarna är evolutionsforskning och biodiversitetsforskning båda mycket centrala områden inom genetik, systematik och bioinformatik.

## Styrkor och svagheter

Genetisk forskning relaterad till evolutionsgenomik, biodiversitet och studier av specifika organismer finns i dagsläget vid många universitet. En stor del av aktiviteterna närmar sig allt mer den moderna genetiska forskningen och angränsande genomik, ekologi, fysiologi, cell- och molekylärbiologi. Många forskare har gått från andra discipliner, till exempel ekologi och fysiologi, till mer genetiskt inriktad forskning, då möjligheten successivt ökat att förstå ekologiska och fysiologiska processer med hjälp av genetiska angreppssätt.

Inte minst i gränslandet till ekologi och cell- och molekylärbiologi finns idag flera mycket starka forskargrupper i Sverige och denna forskning är idag på kraftig frammarsch. Forskningsinriktningar i Sverige, som idag är världsledande, är också i ett flertal fall starkt evolutionärt inriktade och en hel del av dem fokuserar på forskning som handlar om hur variation inom arter (biodiversitet på gennivå) utvecklas och i slutändan hur nya arter utvecklas (biodiversitet på artnivå). Här finns också forskning som studerar samevolution mellan organismer och evolutionära förändringar framkallade av mänsklig påverkan.

Systematisk forskning har starka traditioner i Sverige med rötter i Carl von Linnés arbete, som måste säkras med resurser för samlingarnas skötsel och utveckling. Modern svensk systematik har legat i täten när det gäller att utveckla metoder, både idémässigt och i form av datoralgoritmer, t.ex. inom praktiskt taget all fylogenetisk

analys. Trots den svenska systematikens starka idémässiga förnyelse och dess världsledande ställning, har ämnet haft mindre attraktionskraft på studenter än till exempel ekologi, och vid flera universitet i Sverige är den systematiska forskningen idag försvagad eller nedlagd. Det svenska artprojektet som drivs av Artdatabanken vid Sveriges lantbruksuniversitet (SLU) har dock möjliggjort rekrytering av ett mindre antal nya unga systematiker (doktorander och forskarassistenter), men denna insats är inte tillräcklig för att hålla svensk systematik levande och vital. Kunskapen om systematik och artdatabanker borde kombineras med ny genetisk forskning, så att dessa resurser kan utnyttjas till sin fulla potential, inklusive rörande unika nordiska arter.

Bioinformatisk kompetens efterfrågas idag i accelererande takt och bristen på bioinformatiker är redan påtaglig (även internationellt). Dock har under de senaste åren en klar förstärkning skett i samband med tillväxten av generella bioinformatik-resurser inom WABI, BILS och SciLifeLab, vilka erbjuder både långtids och korttids service samt ett stort utbud av kurser i bioinformatik. För att motverka att bioinformatik blir en flaskhals för de flesta forskningsfält inom den moderna genetiken behövs ytterligare förstärkningar inom detta område. Det är också viktigt att bioinformatik i sig själv blir ett starkt forskningsämne och inte enbart ett ”stötdämne”. Ett sätt, förutom en stark infrastruktur, är att ytterligare rekrytera bioinformatiker från starka forskningskonstellationer inom evolutionsgenetik och biodiversitet samt tydliggöra karriärmöjligheterna för dessa bioinformatiker. Här krävs en förståelse för vikten av tvärdisciplinära miljöer och att delade förstaförfattarskap och senior författarskap kan ha en betydelse då komplementära kompetenser bör värderas lika högt inom större forskningsprojekt.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Forskning inom dessa områden utvecklas idag i rasande takt tack vare nya mycket innovativa tekniker som möjliggör tester av klassiska (tidigare olösta) frågeställningar. Det är två stora förändringar som just nu sker inom genetiken: (1) Från att tidigare endast kunna generera kvalitativa resultat genom studier av enskilda genlokus kan idag kvantitativa resultat genereras med studier av stora delar av genomen. (2) Från att tidigare ha varit begränsade till ett litet antal modellarter i laboratoriet kan idag omfattande genetiska studier genomföras även på ”vilda” arter och populationer inom dessa arter. Detta innebär att frågeställningar av nedan listade och liknande frågeställningar numera kan adresseras för organismer i sin naturliga miljö:

- Hur stor andel av genomet är under naturlig selektion?
- Beror evolution på lokal anpassning på existerande alleler i låga frekvenser eller på nya mutationer?
- Vilka och hur många genlokus är inblandade i utveckling av nya arter?
- Hur snabbt anpassas organismer till förändringar i miljön?
- Vilka gener är viktiga för vissa karaktärer?
- På vilket sätt samverkar gener och miljö för att åstadkomma vissa egenskaper?

Viktig är också utvecklingen av storskalig metodik med hjälp av vilka alla geners uttrycksmönster kan avläsas samtidigt. Man kan alltså studera vilka gener som är ”på” respektive ”av” under olika delar av en organisms utveckling och under olika miljöbetingelser. Till detta kommer en ökad förståelse om andra funktionella regulatoriska molekyler och element i arvsmassan såsom lncRNAs, microRNAs, enhancers, insulators, samt vikten av t.ex. transposoners insertioner i arvsmassan och dess utveckling.

Möjligheterna att studera kopplingen mellan genotyp (den genetiska informationen hos en individ) och fenotyp (egenskaper hos en individ) ökar alltså för alla typer av organismer och här begränsar inte framför allt längre tillgängliga genetiska metoderna utan istället tillgången på bra provmaterial. Det är därför viktigt med möjligheter att samla in bra material från olika organismer, djur, växter och mikroorganismer, möjligheter för biobankning och när så behövs, resurser som kan avsättas till att hålla organismer av en art i odling under flera generationer. För att den moderna genetiken och systematiken på allvar ska kunna ta steget ut i naturen behövs nu satsningar på relevant infrastruktur för odling och experimentell biologi där omvärldsfaktorer kan manipuleras. För speciellt mikroorganismer blir det också allt viktigare att kunna sortera fram enstaka celler, s.k. ”single-cell analysis” och studera dem var för sig för att se hur arvsmassan och/eller genuttryck har förändrats i individuella organismer eller celler. Dessa typer av metoder kommer ha stor betydelse både för att

studera evolutionsbiologi och biodiversitet, ett område som blir alltmer betydelsefullt i takt med förändringar i miljön.

Bioinformatikens stora möjligheter ligger som tidigare framgått i att efterfrågan av denna kompetens är mycket stor från i princip all biologisk forskning. Bioinformatiken kommer av nödvändighet att ha en starkt stödjande roll, men måste också tillåtas utvecklas och profileras på egna villkor, där inte minst forskaranställningar och meriteringsvägar är tydliga och tillgängliga. Idag är tillgången på framstående forskningsprofiler som kan leda och stimulera framväxten av unga kompetenta bioinformatiker starkt begränsad.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Forskning inom genetik, genomik och bioinformatik relaterat till evolutionsgenomik (systematik) och biodiversitet växer allt mer internationellt i samband med att sekvensmetoder blir allmänt tillgängliga och fler och fler organismer får sina arvsmassor kartlagda. Svenska forskare ligger framme inom flera av dessa områden, men eftersom utvecklingen sker i en närmast explosionsartad takt då priserna på sekvensering fortätter att sjunka krävs fortsatt utveckling och satsning inom genetik, genomik och bioinformatik.

## Forskningsinfrastruktur

Forskningen beskriven här har ett stort behov av storskalig genomik, ”single cell analys” och ”tillämpad” bioinformatik (alltså tillämpningen av de metoder för analys och hantering av stora datamängder som bioinformatisk forskning och utveckling tar fram).

Av dessa är sannolikt bioinformatiken den bit som är svårast att få att växa i den hastighet som krävs. Idag finns initiativ ifrån Vetenskapsrådet och KAW (BILS – kortsiktigt bioinformatikstöd, SNIC/UPPNEX – data lagring och beräkning och WABI – långsiktigt bioinformatik) – vilka alla anknyter till SciLifeLab och skapar en nationell infrastruktur för bioinformatik. Dessa är goda initiativ, men behovet är redan större än vad dessa satsningar kan täcka. Viktigt är dock att infrastruktursatsningar kompletteras med en ökad rekrytering av bioinformatiker, både som deltagare i forskningsprojekt och som individuella forskningsledare som kan driva analytisk metodutveckling inom evolutionsgenomik och biodiversitet.

Ett ytterligare område inom evolutionär och ekologisk forskning där infrastruktur skulle vara av betydelse är en samlande och stark biobanksinfrastruktur relaterad till icke-humana prover av olika slag: växter, husdjur, vilda djur och mikroorganismer, men även jord och vattenprover. T.ex. en biobank har initierats av SLU men hamnar hittills utanför den humana biobanksstrukturen BBMRI.se, framförallt på finansieringssidan. Då fältstationer, och individuella biobanker redan finns, krävs dels en mer registerliknande resurs, som kan visa existerande provsamlings, dels en aktiv funktionell biobanksresurs för nya prover av intresse (t.ex. husdjursgenetiska prover). För att den nya sekvensbaserade genetiska forskningspotentialen ska kunna realiseras för ekologiskt och evolutionärt intressanta organismer, behöver dessa arter också kunna odlas och hanteras experimentellt under kontrollerade former i växthus, terrarier och akvarier.

## Organismbiologi

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Ämnesområdet handlar om organismers anatomi och fysiologi samt effekter av interaktioner med den miljö dessa organismer lever i. Området inkluderar såväl mikroorganismer som makro-organismer som växter och djur. Metodologiskt sträcker sig organismbiologin därför över ett brett fält av fysiologi med inslag av biokemi samt cell- och molekylärbiologi. Ämnets särställning ligger i strävan att förstå komplicerade kaskadeffekter av olika typer av biotiska och abiotiska faktorer på hela organismen.

Organismbiologin omfattar en rad olika forskningsområden, som t.ex. reproduktionsbiologi, regenerations- och utvecklingsbiologi (vilket inkluderar evo-devo utvecklingsbiologiska frågeställningar), immunologi, toxikologi, strukturell och funktionell morfologi, klassisk fysiologi och metabolismfysiologi. Inom den gren av



organismbiologin som fokuserar på olika djurarter finns det idag forskargrupper i Sverige som arbetar inom områdena neuro- och sinnesfysiologi, respirations-, cirkulations-, gastrointestinal och metabolismfysiologi. Forskningsfältet håller också på att expandera in i andra områden. Ett exempel på sådan expansion är ekofysiologi, som är ett framväxande forskningsområde vilket blandar klassisk fysiologi med ekologi där fokus ligger på organismen och dess interaktion med sin miljö. Inom växtdelen av organismbiologin arbetar man idag med problem kring fotosyntes, transportmekanismer och tillväxt, och inom mikrobiologin studeras bland annat signalering mellan patogena organismer och deras värdorganismer. Idag förekommer också organismbiologisk forskning inom epigenetiken.

## Styrkor och svagheter

I likhet med den medicinska forskningen används ofta modellorganismer inom organismbiologiforskningen, vilket är både en styrka och en svaghet. Styrkan ligger i att man för en modellorganism har mycket bakgrundsfakta (genom, fysiologi, beteende, ekologi o.s.v.) som gör det enkelt att gå vidare. Nackdelen är att man ofta förlorar fokus på diversiteten och den naturliga variationen, vilket kan leda till förenklade, eller till och med felaktiga, slutsatser. Det är viktigt att den jämförande biologin inte går förlorad bara för att man fokuserar på några få modellorganismer, detta gäller över hela skalan inom området. Resultat från modellorganismerna måste därför testas i ett större perspektiv.

Idag börjar sekvensering och andra tekniker, som tidigare utgjorde en barriär för större jämförande studier, bli mer allmänt tillgängliga. Det innebär att man inte behöver fokusera så strikt på en modellorganism, utan kan använda de organismer som bäst lämpar sig för att studera ett fenomen.

Sverige ligger idag i forskningsfronten inom en rad områden. Fortplantningsbiologin på växtsidan och neuronalforskning inom på djursidan är två starka områden. Vi har även starka forskningsmiljöer inom bruntfett området och cellbiologiområdet, där det är en flytande gräns mot andra ämnesområden.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Den traditionella organismbiologiska forskningen har tagit hjälp av utvecklingen inom cell- och molekylärbiologi, och även utvecklingen av elektronik och mätteknik har gynnat området. De nya metoderna har öppnat nya möjligheter till dels mekanistiska förklaringar, dels mätningar som tidigare inte varit möjliga. Kostnaderna för många mät- och analysmetoder sjunker, vilket möjliggör en bredare användning av vad som tidigare var specialistutrustning. Toxikologisk forskning med hela organismen i fokus ökar i Sverige och utvecklingen går mot mer komplexa testsystem med kombinatoriska tester både när det gäller olika kemikalier och för enskilda ämnen och interaktioner med biotiska faktorer. Sverige har under de senaste åren också rönt internationell anseende för en del mycket välplanerade fältstudier, som inte varit möjliga att genomföra i traditionell laboratoriemiljö.

Ett område som växer starkt är 3D-organkulturer med komplexa celltyper. Här blir avgränsningarna mellan cell- och organismbiologi otydlig då man ofta inom organismbiologin går ner på både organ- och cellnivån för att studera mekanismer. När man nu börjar kunna odla fungerande tredimensionella organ, med olika differentierade celltyper, öppnas nya modeller för organismbiologin, där man kan studera mekanismer i reducerade organsystem.

Ett fält inom organismbiologin, som redan är stort internationellt och som växer, är ekofysiologi, där gränserna mellan fysiologi och ekologi suddas ut; fokus ligger på fysiologi och heldjursstudier, men med tydliga kopplingar till ekologiska aspekter. Detta område är än så länge litet i Sverige men växer dock långsamt, vilket bland annat avspeglas av att det börjar dyka upp kurser i ekofysiologi på masternivån inom grundutbildningen.

Matematisk modellering, som håller på att växa fram som en (stöd)disciplin inom organismbiologin, och den starkt växande bioinformatiken, är väldigt viktiga för funktionsgenomiska studier. Andra områden som utvecklas är systembiologi, nanobiologi och biomimetik; detta är tvärvetenskapliga fält som kommer att få större betydelse, och där Sverige redan idag i en del fall är väl framme internationellt sett och genom relevant forskningsstöd kan nå ännu längre.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Organismbiologiforskningen har under ett antal år minskat, vilket har lett till att läkemedelsindustrin och bioteknikföretag idag har svårt att hitta personer med kunskap inom området. Med den snabba utvecklingen inom cell- och molekylärbiologin har fokus flyttats från traditionell organismbiologi. Cell- och molekylärbiologins snabba utveckling utgör i sig inget hot, tvärtom så kan synergier uppstå och cell- och molekylärbiologiska metoder är mycket bra redskap även inom organismbiologin. Men organismbiologins heldjursnivå bör inte gå förlorad. Den behövs för att undersöka hur de olika fysiologiska processerna interagerar och hur detta påverkar organismen i sin helhet.

Sverige är inte unikt, detta har varit en internationell trend, men det verkar finnas en svag återhämtning. Framväxten av till exempel ekofysiologin, en disciplin där den traditionella fysiologin möter ekologiska frågeställningar, har stor potential bland annat inom forskning om vattenbruk och om effekterna av den pågående klimatförändringen. Som ett exempel handlar en del av dagens klimatdebatt om biodiversitet och om hur miljöförändringar kommer att påverka olika typer av organismer, och i slutändan människan och samhället i stort, vilket i många fall kräver studier på organismnivå.

Sverige har internationellt stark forskning inom evolutionär fysiologi, här överlappar man med genetik och använder sig av metoder från cell- och molekylärbiologin, men hela tiden med organismen i fokus. Växtfysiologi är ett annat starkt forskningsområde i Sverige speciellt när det gäller modellorganismer som t.ex. asp där forskningen längre inriktats på effekter av olika växthormoner och av xylem- och vedbildning. Inom samma område har också forskningen på energimetabolism (fotosyntes och respiration) en stark internationell ställning. Den starka organismbiologiska zoologiska forskningen är koncentrerad till ett fåtal starka miljöer som ofta drivs av enstaka framgångsrika forskargrupper eller forskare. Traditionellt har vi i Sverige bedrivit högkvalitativ forskning inom neurobiologi med nejonöga som modell och även sinnesbiologisk forskning om både syn- och luktsinnet är av internationell klass. Under de senaste åren har också forskning om fettmetabolism och evolutionsbiologin växt fram och blivit uppmärksammas. Vi har idag även internationellt erkänd forskning inom områdena matsmältning, toxikologi och immunologi.

Organismbiologi är fortfarande ett relativt litet forskningsfält i Sverige jämfört med många andra länder och verksamheten är koncentrerad till ett fåtal olika forskargrupper runt om i landet. Forskningsområdet växer sakta men på grund av Sveriges begränsade antal lärosäten som bedriver forskning täcks inte alla områden in. För att stödja utvecklingen av organismbiologi och de miljöer där denna typ av forskning bedrivs behövs dels stöd för forskningen, dels stöd till rekrytering av unga forskare, antingen inom befintliga eller genom att bygga upp nya forskargrupper på andra ställen. Samtidigt är det viktigt att utbildningen på grund- och avancerad nivå tar upp denna typ av forskning.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Genom de förändringar som genomförts de senaste åren när det gäller infrastrukturstöd blir det allt besvärligare att upprätthålla och driva befintliga infrastrukturer. Än mer problematiskt blir det att starta och driva nya anläggningar som skulle kunna underlätta för forskare som inte har råd eller kapacitet att sätta upp egna laboratorier/system med dyrbar utrustning eller höga utvecklingskostnader. Inom organismbiologiområdet har det de senaste åren förts fram förslag på infrastruktursatsningar inom områdena biobanker och mikroskopi. När det gäller biobanker för prover både inom växt- och djurrikena, skulle detta underlätta sökning och göra forskningsdata allmänt tillgängliga. När det gäller mikroskopin (t.ex. konfokal- och elektronmikroskopi) har priserna på utrustningen visserligen sjunkit avsevärt, men det återstår fortfarande landvinningar att göra genom fortsatta infrastruktursatsningar inom området.

## Övergripande områdesbeskrivning

Data- och informationsvetenskaperna är relativt unga vetenskaper, men har haft en enastående utveckling, med genomgripande påverkan på samhället och våra liv. Någon inbromsning är inte i sikte, och den snabba utvecklingen skapar en rad nya vetenskapliga utmaningar. Hit hör hur, inom en rad områden (exempelvis genkartläggning, och kunddata från sociala medier), de datamängder som behöver analyseras växer så snabbt att inte ens den exponentiella utveckling av hårdvaruprestanda som länge pågått håller jämna steg. Detta skapar behov av tekniker som parallellism och distribuerad beräkning inklusive så kallad cloud computing, som i sin tur genererar nya utmaningar i frågan om tillgänglighet, tillförlitlighet, säkerhet och integritet. En annan följd av de snabbt växande datamängderna är ett ökande behov av storskaliga datacentra med tillhörande kompetens.

Inom datorsystemområdet har den höga integrationsfaktorn lett till att energi- och effektutveckling blivit den allt överskuggande begränsande faktorn, till följd av dels kostnader för och möjlighet till kylning, dels begränsad batterikapacitet i mobila enheter, där prestanda tidigare varit den huvudsakliga drivkraften. Denna utveckling tvingade kring mitten av 00-talet fram flerkärniga processorer för allmänt bruk, vilket dock inte längre räcker. Allt fler forskare och utvecklare intresserar sig därför för heterogena system, med specialiserade komponenter som släcks ned när de inte används, vilket skapar nya svårigheter inom datorarkitektur och programvaruteknik.

Programvarutekniken står också inför andra utmaningar. Förutom parallellism, som redan nämnts, gäller det bland annat metoder för felsökning, feleliminering och feltolerans, liksom robusta och skalbara metoder för andra kvalitetsattribut som resurseffektivitet och funktionell säkerhet. Forskningen på området har traditionellt fokuserat på att utveckla mjukvara från grunden, men medvetenheten ökar om behovet av att behandla återanvändning av programvara, för att på så vis bättre ansluta till hur mjukvaruutveckling oftast går till i praktiken.

Studiet av algoritmer är ett av datavetenskapens mer matematiserade områden. Samtidigt fortsätter det att vara relevant för tillämpningar, och idag fungerar beräkningsbiologin som en av flera rika källor till nya frågeställningar inom området. Fokus har oftast varit på värsta fall-analyser, och en stor utmaning är att göra mer nyanserade analyser grundade i realistiska modeller för indata.

Svensk forskning inom data- och informationsvetenskap är överlag stark, med forskning av internationell toppklass inom bland annat algoritmer, bildanalys (inklusive datorseende), datavisualisering, interaktionsdesign (där så kallad participatory design är en svensk paradgren), datorarkitektur, och flera inriktningar av programvarutekniken som parallellprogrammering, programvaruteknik för realtids- och inbyggda system, och empirisk programvaruteknik. Forskningslandskapet är relativt komplett i den meningen att det finns få större områden där svensk verksamhet helt saknas. Dock har verksamheten inom många områden, inklusive sådana där vi är världsledande, alltför liten omfattning och bredd. Detta riskerar leda till att forskningsmiljöer blir subkritiska, och – vilket är tydligt på algoritmområdet – att vi inte klarar att fullt ut möta behovet av avancerade kurser, med negativa långsiktiga konsekvenser för kunskapsnivån i landet.

## Algoritmer

### Beskrivning av forskning inom ämnet

Studiet av algoritmer är en central del av datavetenskapen som behandlar konstruktion och analys av metoder för resursmedveten beräkning. I föreliggande beskrivning omfattar ämnet även stora delar av beräkningsteorin, inklusive teorin för beräkningskomplexitet.

De mest väletablerade delarna av ämnet, *konstruktion och analys av algoritmer* samt *beräkningskomplexitet* är av matematisk natur och har starka kopplingar till olika matematiska discipliner som grafteori, kombinatorik, logik och sannolikhets teori. Det huvudsakliga målet är att systematiskt studera beräkning med syftet att etablera

allmängiltiga utsagor om grundläggande beräkningsproblem i olika beräkningsmodeller. Bidraget till praktiska beräkningar är i form av allmän förståelse för beräkningsproblem samt utvecklandet av nya metoder för att lösa dessa.

Mer tillämpad forskning inom ämnet fokuserar på konstruktion och analys av algoritmer från områden både inom och utom datavetenskapen, till exempel biologi, ekonomi, signalbehandling, och WWW. Forskningen kring dessa algoritmer innehåller även empiriska studier av deras beteende, ingenjörsaspekter av deras utveckling och återkoppling till modelleringsaspekter i användningsområdet. Med ökad *algoritmisering* av i princip alla datadrivna vetenskaper är potentialen för synergier med andra discipliner enorm.

Alla delar av algoritmisk forskning påverkas av *nya beräknings- och datamodeller* som motiveras av aktuella utvecklingar inom informationsteknologin, till exempel massiva datamängder, parallella och distribuerade arkitekturer, strömmande data, energieffektiva beräkningar, säkerhets- och integritetsaspekter samt experimentella teknologier som kvantdatorer.

## Styrkor och svagheter

Det systematiska studiet av algoritmer har funnits i 50 år, och har haft stort inflytande genom att många av dess resultat har spridits till andra vetenskaper och undervisas i grundläggande kurser. Områdets styrka är ett starkt matematiskt fundament, en tradition att betrakta problem på många abstraktionsnivåer och teknologisk lyhördhet och samutveckling med informationsteknologin. Internationellt finns det ett mycket starkt utbyte både med andra vetenskaper och med programvaruindustrin.

Vill man peka på områdets svagheter, så skapar en del av teoribildningen – i likhet med annan grundforskning och tillämpad matematik – ibland rent internt motiverade frågeställningar som visar sig vara ofruktbara. Vissa resultat är ej direkt applicerbara på de beräkningsproblem som uppstår i olika tillämpningar. En annan utmaning är den starka ställning som analysen av algoritmers värstafallsbeteende har – denna dominerar områdets kvalitetskriterier på bekostnad av indata modeller som är svårare att definiera stringent, men som i vissa tillämpningar vore mera relevanta. Behovet av matematisk stringens och teknologisk flexibilitet leder också till att profilen för kandidater till forskning i algoritmik är attraktiv för många andra riktningar både inom och utom akademien, vilket skapar ett visst rekryteringsproblem (konkurrens om unga talanger).

Specifikt svenska svagheter i området behandlas nedan.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Den grundläggande forskningen inom teoretisk datavetenskap, såsom algoritmteori, är bland de äldsta ämnena i datavetenskapen och har mognat till en matematisk disciplin med rik teoribildning och starka resultat. Det traditionella syftet är att skapa, analysera, och resonera kring algoritmer för problem på diskreta strukturer med avseende på stringenta värstafallsgarantier för algoritmers asymptotiska resursförbrukning och lösningskvalitet som funktion av problemstorleken. Man kan idag påstå att de allra flesta naturliga beräkningsproblem är, grovt sett, klassificerade med avseende på beräkningskomplexitet. Pågående forskning har flyttat fokus till mer specialiserade problem och sofistikerade frågeställningar, som ofta är inomvetenskapligt motiverade.

### Algoritmisering och datorisering

Algoritmteorin utmanas ständigt av nya beräkningsmodeller motiverade av aktuell informationsteknologi och nya frågeställningar från andra vetenskaper och samhället. Ett numera klassiskt exempel är beräkningsbiologin, som idag är ett separat forskningsområde med egna utbildningar, publikationsföretag och anslag, men som fortfarande utgör en rik källa till algoritmiska frågeställningar; algoritmik bidrar både till effektiv lösning av exempelvis olika proteinviknings- eller sekvenseringsproblem, men också till modellering. Till exempel är synen på evolution under *den algoritmiska linsen* att DNA är en algoritm som exekveras av proteiner. Härvid betonas fenomenets process- och informationsaspekter, vilket kompletterar exempelvis elektrokemiska eller zoologiska perspektiv på evolution.

Ett exempel på en teknologisk påverkan är den pågående utvecklingen inom minnesteknologi och sensorer, där mängden av data som insamlas och behöver analyseras överstiger utvecklingen i beräkningskraft. Man kan säga att moderna datorer blir allt långsammare i relation till sina arbetsuppgifter. Behovet och effekten av algoritmer för analys av massiva datamängder är numera enorm, inte bara i vetenskapliga tillämpningar, utan också i samhället, där algoritmer används till att reglera grundläggande demokratiska mekanismer som tillgång till information. Detta skapar stort behov av stringenta analyser och nya lösningar.

Det algoritmiska perspektivet fortsätter att ha konceptuell påverkan på traditionellt icke-datalogiska discipliner, när dessa utvecklar modeller som tar hänsyn till processers effektivitet och resursförbrukning. Ett exempel är statsvetenskap och ekonomi, där *algoritmisk spelteori*, *algoritmisk mekanismkonstruktion* och *computational social choice* är aktuella ämnen som uppfattar ekonomins individbegrepp som *resursbegränsade* agenter vars val inte bara är individuellt optimala men även skall kunna fattas av en effektiv process. Dyliga utvecklingar har åtnjutit stor internationell uppmärksamhet och har rik potential för tvärvetenskaplig korsbefruktning.

### Några trender

Några konkreta aktuella trender inom algoritmeforskning med stor internationell uppmärksamhet är:

- Nya tekniker och modeller för konstruktion och analys av algoritmer utöver deterministisk och sekventiell beräkning: randomiserad, algebraisk, approximativ, exakt, on-line, strömmande, energisnål, parallell, distribuerad; olika minnesarkitekturer, olika programspråkparadigm såsom constraint eller map-reduce, alternativa beräkningsmodeller som kvantdatorer.
- Tillämpad algoritmik inom andra delar av datavetenskapen och relaterade tekniska vetenskaper: artificiell intelligens, programspråksteori, databaser, datorsyn och -grafik, robotik, sociala nätverk, sensornätverk, signalbehandling, etc.
- Ramverk för empirisk analys av algoritmer.
- Algoritmiska metoder och modeller i andra, icke-datalogiska discipliner: algoritmisk spelteori (ekonomi), sociala nätverk (sociologi), *computational finance*, datoriserade bevis i matematik, beräkningskemi, etc.
- Algoritmiska aspekter av datasäkerhet: främst kryptologi inklusive protokoll och beräkningskomplexitet, sekretess, integritet, säkerhet, autentisering, etc.
- Nya modeller och tekniker för beräknings- och kommunikationskomplexitet, avrandomisering, undre gränser, icke-approximerbarhet, kvantitativ komplexitet av svåra problem, parameteriserad komplexitet och andra flervariata analysmått.
- Datastrukturer och algoritmer för analys och behandling av massiva datamängder, maskininläring, dataanalys och klassificering av ostrukturerad data.
- Konstruktion och analys av algebraiska, diskreta, och symboliska algoritmer för vetenskapliga beräkningar.
- Nya optimeringsalgoritmer för linjär och icke-linjär programmering samt stringent analys av optimeringsalgoritmer under olika fördelningar av indata;
- Algoritmer och samhället: analys och metoder för informationssäkerhet, transparens.

Att stora delar av natur- och teknikvetenskaperna just nu upplever en ökad algoritmisering av både tekniker och tankesätt understryker behovet av både algoritmisk kompetens på den icke-datalogiska sidan och ökad domänkunskap på den datalogiska sidan.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

### Internationellt

Ur internationellt akademiskt perspektiv står forskning om algoritmer som ett centralt och stort ämne inom datavetenskap. Till exempel är *Algorithms and Theory* det datavetenskapliga ämnet med flest professorer vid amerikanska toppuniversitet. Även de teoretiska aspekterna är utomordentligt välfinansierade; till exempel

grundades *Simons Institute for the Theory of Computing* vid UC Berkeley år 2012 med ett årligt anslag på 60 miljoner USD.

Algoritmiska kompetenser uppfattas numera som nödvändiga för många andra discipliner. Till exempel läser mer än var fjärde studenter på Princeton University grundkursen i algoritmer och datastrukturer. Algoritmiskt tänkande är numera ett grundskoleämne i Storbritannien. På arbetsmarknaden är algoritmisk kompetens starkt efterfrågad av attraktiva programvaruföretag som Google.

## I Sverige

Undervisning inom algoritmer och datastrukturer uppfattas som central datalogisk verksamhet på ett flertal universitet och högskolor och ingår i grundutbildningen på många datavetenskapliga och -tekniska program. Däremot är kurser i beräkningskomplexitet och -teori mer sällsynta och gruppen av svenska studenter utanför datavetenskapliga och -tekniska program som uppnår algoritmisk kompetens är mycket liten.

Nivån för svensk forskning inom ämnet är av internationell toppklass, men storleken av de flesta forskningsgrupperna i Sverige inom ämnet är under kritisk nivå.

Studiet av effektiva algoritmer har i Sverige inte utvecklats på ett så positivt som man kunde hoppats och en förväntad expansion har inte kommit till stånd. Kontrasten är extra oroande när man jämför med utlandet. Om området ej uppnår kritisk nivå kan detta ha negativa effekter på kunskapsnivån i landet. Det finns högst ett par starka grupper inom algoritmeforskning och kompetensen är otillräcklig för att ens på ett adekvat sätt klara av behovet av avancerade kurser. Beräkningskomplexitet är än mer glest representerat. Denna negativa utveckling påverkar både den datavetenskapliga forskningen och andra datadrivna vetenskaper som upplever ett starkt behov av algoritmisk kompetens samt stora delar av innovativ programvaruproduktion, inte minst i relation till stora datamängder; aktuella modeord är *Big Data* och *Cloud Computing*.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Forskning inom algoritmer skapar inte själv något behov av forskningsinfrastruktur utöver de beräknings- och datalagringsresurser som krävs av ett eventuellt tillämpningsområde. Några utmaningar som datadrivna vetenskaper kommer att möta i samband med analys och förvaltning av data (skalbarhet, tillgänglighet, effektivitet, visualisering, integritet, tolkning, etc.) möts dock av just algoritmeforskningen varigenom det kan uppstå behov av realistisk infrastruktur för validering och simulering av sådana lösningar.

# Bildanalys och visualisering samt interaktionsdesign

## Beskrivning av forskningen inom ämnet

Denna ämnesbeskrivning behandlar bildanalys, visualisering och interaktionsdesign (IxD). Bildanalys avser extraktion av information ur bilder från sensorer, visualisering genererar bilder med hjälp av datorer, och IxD avser interaktion mellan människa och digitala material, föränderlig över tid.

Bildanalys syftar till att använda beräkningar för att extrahera information ur existerande visuella media, såsom foton från en eller flera kameror, videosekvenser, eller ”inscannade” objekt, till exempel via MR-kameror eller laserscannern. Målet kan exempelvis vara att känna igen ansikten i foton, eller att extrahera djupinformation ur bilder för att bygga upp rumslig kännedom om till exempel en byggnad eller ett rum. Även datorseende och beräkningsfotografi ingår naturligt i ämnet.

Visualisering är den vetenskapsgren där bilder genereras med datorer utifrån datamängder. Detta kan vara geometriska objekt med materialbeskrivningar, och målet kan vara att generera bilder som är fotorealistiska, att skapa djupare förståelse för data och/eller att göra det snabbt nog för att kunna användas interaktivt. Det kan också vara visualisering av vetenskapliga data, såsom bilder från MR-kameror, eller data genererat genom simuleringar av olika slag. Parallella beräkningsarkitekturer speciellt för datorgrafik med tillhörande

kompiatorer och språk utvecklas också inom området, och används kraftigt även inom andra grenar. Geometriska beräkningar ingår till viss del också.

IxD-forskning tar fram ny design, metoder och teknik för att skapa interaktiva digitala produkter, miljöer, system, tjänster och artefakter. Fokus är på form men också på hur interaktionen ska förlöpa i dialogen med människan – att förstå användarbeteenden och kontexten för interaktionerna. Det finns två målsättningar med IxD som ofta samverkar och styr designprocessen: att skapa *användbara* produkter och att skapa intressanta och estetiska *användarupplevelser*.

## Styrkor och svagheter

Forskningsmässigt så är bildanalys och i än högre grad datorseende områden där Sverige får räknas som väldigt starka, med relativt många och stora grupper. Flera av dessa grupper når också fram till de absolut bästa tidskrifterna och konferenserna, och detta sker ofta genom samarbete över gränserna. Exempel på detta kan vara kopplingar till det medicinska området, trafikövervakning, och robotik. Därmed finns det också ofta starka samarbeten med industrin i Sverige, och i flera fall har forskningen resulterat i startupföretag. Delar av forskningen handlar om optimering och effektiva algoritmer.

För bildanalys kan realtidsapplikationer, drivet av mobiler eller robotik, vara målet. Alternativt kan fokus ligga exempelvis på att hantera gigantiska datamängder från internet eller från nya typer av sensorer (till exempel MR eller mikroskop). GPU:er (grafiska beräkningsenheter, så kallade grafikkort) används också, och detta är en möjlig brygga över till visualiseringsområdet. Ett annat stort område är medicinsk bildanalys, där målet är att extrahera information som kan hjälpa läkare att ta snabba och korrekta beslut. Detta kan ha ännu större potential med tanke på den starka medicinforskningen i Sverige. Hela bildanalysområdet bedöms som väl täckt av svenska forskningsgrupper.

Ett område som är representerat i Sverige men som skulle behöva växa är beräkningsfotografi (eng: computational photography), som är starkt kopplat till bildanalys och datorseende. Definitionen på beräkningsfotografi är inte helt tydlig, men man kan säga att det handlar om att ta digitala fotografier med hjälp av vanliga eller modifierade kameror, och sedan använda datorer för att ”förbättra” bilderna i något annat avseende än att extrahera information ur dem. Ämnet spänner över bildanalys, datorseende, och datorgrafik.

Inom forskning på området datorgrafik och visualisering var Sverige (sett relativt USA och stora delar av Europa och Asien) länge svagt. Detta har dock förändrats kraftigt under 2000-talet, då ett litet antal starka forskningsgrupper byggts upp i landet. Här kan man se att även små forskargrupper, med så lite som tre-fyra personer, kan stå sig mycket väl i den internationella konkurrensen, vilket framför allt kan fungera i grundforskning, men kan bli svårare när det handlar om att bygga stora system. En av orsakerna till att datorgrafik växt är att det finns företag som behöver välutbildad personal inom området. Det kan röra sig om spelföretag men även om företag inom telekomsektorn, som alltmer använder sig av grafik i sina enheter. Därmed har det också dykt upp forskningsmedel som varit direkt kopplat till detta område.

Vad gäller visualisering är Sverige speciellt starkt inom datavisualisering och dess tillämpningar, samt realtidsdatorgrafik med tonvikt på grundläggande forskning. Inom datavisualisering har man tagit sig an att omformulera och utveckla nya algoritmer för att kunna exekveras på GPU:er. Inom realtidsgrafiken ligger fokus på effektiva algoritmer och optimering av synlighet (eng: visibility) och kunskapskodning i gränslandet mellan bildanalys och visualisering. Sverige får anses som väldigt starkt också inom detta område. Det finns också ett visst fokus på hur dessa algoritmer kan köras på parallella arkitekturer (till exempel GPU:er) eller hur grafikhårdvara kan förändras för att stödja dessa. Ett ökande fokus på området fotorealism och interaktion har vuxit fram; här konstruerar man algoritmer som har som mål att generera bilder som ser ut som foton och där man interaktivt kan manipulera dem. Allteftersom datorer och olika beräkningsarkitekturer blir snabbare, så kommer denna sorts algoritmer bli mer och mer intressanta även för realtidsgrafik. Forskning inom mobilgrafik har försvunnit under de senaste åren, genom att frågeställningarna (till exempel energieffektivitet) blivit relevanta även för ickemobil grafik. I och med att ämnet är relativt ungt i Sverige, finns det områden där forskning i stort sett saknas, exempelvis animering, modellering, och geometriberäkningar.

IxD har stor betydelse för många olika användningssituationer: informationshantering, kommunikation, spel, samhällstjänster, hälsotjänster, underhållning med mera.

Designarbetet inkluderar och är baserat på ett flertal olika tekniska infrastrukturer: webbaserad, mobil interaktion, Internet-of-Things, inbyggda system med flera. Syftet är design för många olika användningskvalitéer inklusive instrumentella, upplevelseorienterade, sociala och lärande. Då Sverige har en stark industri inom IT- och telekom, men även inom dataspelsindustri, robotindustri, företag som levererar musiktjänster, och automatisering av allt från gruvdrift till skogshantering, har IxD kommit att spela en ökande roll. Sverige är också välkänt i hela världen för det som kallas ”participatory design” eller den skandinaviska designmodellen. Den bygger på den politiska agendan att ge de som använder datorsystem makt över deras utformning. Redan i mitten på 1970-talet påbörjades arbetet med att skapa design tillsammans med användare. Den skandinaviska designmodellen har också funnit nya former såsom etnografi-inspirerad design, framtagandet av kreativa verktyg och material där användare själva kan skapa, eller genom studier av ovanliga praktiker som inspiration till design. Internationellt ligger vi också långt framme med att involvera industridesignern i interdisciplinära forskar- och designteam. Idag görs också viktiga vetenskapsteoretiska bidrag av flera svenska IxD-forskare. Syftet är att artikulera vad designkunskap är, hur vi validerar den och hur vi avgör dess kraft och möjlighet att generera god design.

IxD-forskare förhåller sig till en komplex samling vetenskapliga paradigmer; allt från mer klassiska vetenskapsideal (experiment; mätorienterat; sanningsideal; effektivitetsmätt; etc.) och mer emanciperande perspektiv (aktionsforskning; kooperativ design; etc.) till innovationsdesign (upplevelseorienterad; estetiskt; etc.). Detta kan ses som både en svaghet och en styrka då det krävs både djup och bredd för att skapa god design och grundläggande designkunskap. IxDs unika bidrag till datavetenskapen är en ansats kring helheten: för att skapa goda användarupplevelser såväl som rent verktygmässigt effektiv användning krävs att delarna hänger ihop som en helhet för den som använder systemet/appen/etc. i fråga. Den typen av helhet framträder inte av sig själv i en mer teknikindrivna utvecklingsprocess eftersom sådana oftast når sin framgång genom att plocka isär det komplexa i allt enklare delar och sedan ta sig an varje del för sig. IxD fyller sin funktion i sammanhanget genom att fungera på precis motsatt sätt: genom att sätta ihop saker till att bli meningsfulla helheter som kan förstås, användas och kanske till och med uppskattas.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Ett viktigt område för visualisering men även bildanalys och IxD är “Visual Data Analytics”, ett område som spänner över det mesta av den forskning vi belyser här. Vi får stora mängder data från alla möjliga tjänster och uppkopplade artefakter och i analysen av det data – med visualiseringsmetoder eller andra sätt att göra data tillgängligt – kan vi skapa helt nya tjänster och interaktioner.

De senaste åren har det, internationellt sett, varit mycket tal om att kombinera datorseende med datorgrafik och visualisering, och denna integration har redan börjat. Till exempel finns det flera internationella grupper som har fokus på både datorseende och visualisering. Exempelvis kan datorseendeforskningen använda GPU:er för snabbare beräkningar, och grafiken skulle kunna användas för fotorealism utritning av scener rekonstruerade med datorseendeargoritmer. Det finns ett visst överlapp mellan IxD och datorseende (till exempel igenkänning av rörelser för att styra användarinterface) och mellan IxD och datorgrafik (till exempel utritning av användarinterface). Vidare samarbetar visualiseringsfältet med signalbehandlingsforskare. Grupperna behöver inte slå samman, men möjligheter till samarbete bör absolut tas till vara.

Områden som är möjliga att expandera inom är till exempel beräkningsfotografi och fotorealism. För bildanalysgrupperna som redan sysslar med datorseende är det ett närliggande område, som torde vara relativt lätt att expandera in i. Grupper som håller på med realtidsgrafik kan också relativt enkelt expandera till fotorealismforskning, eftersom detta starkt väntas påverka området realtidsgrafik inom en snar framtid. Även inom kombinationen mellan datorgrafik och datorarkitektur torde finnas möjlighet till ökat utbyte. Vidare finns möjlighet att expandera inom animering, modellering, och geometri, men det ses inte som en nödvändighet; möjligen kan det vara bättre att behålla fokus på några spetsområden än att bli för bred. Sistnämnda bedömning kan dock komma att ändras i framtiden i takt med att ämnet växer.

Å ena sidan har vi numera öppna plattformar där många kan addera tjänster och appar, såsom exempelvis mobilplattformar. Samtidigt står vi inför en stor förändring med Internet of Things och där har vi ännu inte en tydlig öppen plattform, med öppna data och API:er som alla kan använda. Istället är både användare och



artefakter inlåsta i olika inlåsta system. Tekniskt sett måste vi förhålla oss till en uppsjö nätverksprotokoll och trådlösa tekniker.

Då digitala interaktioner är en del av både arbete och fritid, hem, städer, transporter, hälsosystem och myndighetsarbete som når alla, är det också viktigt att etik får en tydlig roll inom forskningssatsningarna.

Hela det datavetenskapliga forskningsfältet, inklusive IxD, har också stora utmaningar i att finna hållbara perspektiv och designprocesser som tar tillvara både material och möjliggör återanvändning.

Vidare bör vi ha ett ökat fokus på integration av estetiska kvalitéer i interaktionsdesignsforskningen.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Sverige är starkt inom alla de tre områden bildanalys, visualisering och IxD. Forskningen inom bildanalys kan anses ha nästintill täckt in området. Visualisering har ett par mycket starka forskningsgrupper – med resultat som gett eko över hela världen, även utanför akademien. IxD-forskningen i Sverige har lyckats etablera design som forskningsfält både nationellt och internationellt.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Nya ”mjuka” former av infrastruktur, såsom öppna data som samtidigt skyddar vår personliga integritet, skulle möjliggöra mer innovation och forskning inom bildanalys, visualisering och IxD.

# Datorsystemteknik

## Beskrivning av forskningen inom ämnet

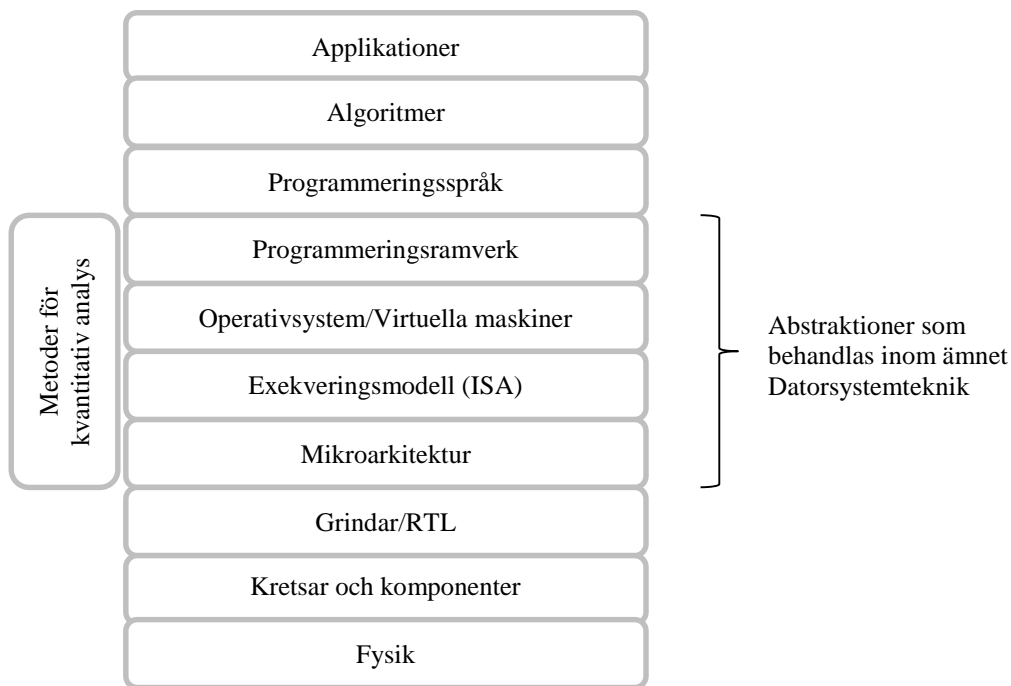
Datorsystemteknik är ett brett teknikvetenskapligt ämne som behandlar principer för konstruktion och analys av datorsystem vilket inbegriper såväl maskinvara, särskilt datorarkitektur, som den programvara som behövs för att datorn ska utgöra ett komplett system. Nära kopplingar finns till ämnen som elektroniksystem och datalogi. Datorsystemen som studeras kan ha vitt skilda tillämpningsområden och karaktär och sträcker sig från små inbyggda system till storskaliga datacenter.

Ämnet är organiserat i flera abstraktionsnivåer. Figur 1 visar på några av dessa och angränsande abstraktionsnivåer. De nivåer som forskningen i Datorsystemteknik i huvudsak inriktar sig på är:

- *Mikroarkitektur*: Principer för implementering av exekveringsmodeller under bivillkor som prestanda, effekt/energiförbrukning, tillförlitlighet med mera under gällande förutsättningar i implementeringsteknologi.
- *Exekveringsmodell*: Principer för konstruktion och definition av det funktionella gränssnittet mot programvaran. Inom ramen för denna abstraktionsnivå hittar vi också forskning inom kompilorteknik.
- *Systemprogramvara* som Operativsystem och/eller Virtuella maskiner: Principer för konstruktion av den programvara som övervakar och fördelar resurserna i ett datorsystem till olika program och användare.
- *Programmeringsramverk*: Principer för hur moderna programmeringsspråk implementeras och understöds för en given maskinvara, inklusive runtimesystem, kompilatorer, bibliotek med mera.

Abstraktionsnivåerna *Mikroarkitektur* och *Exekveringsmodell* representerar kärnan i det underområde till Datorsystemteknik som kallas *datorarkitektur* vilket har en fundamental vikt för datorsystemets totala prestanda. På liknande sätt utgör nivåerna *Systemprogramvara* och *Programmeringsramverk* kärnan i forskningen om storskaliga datacenter.

Tvårs över dessa abstraktionsnivåer löper också studier i *metoder för kvantitativ analys* av datorsystem avseende exempelvis prestanda och energikonsumtion.



Figur 1. Abstraktionsnivåerna som behandlas inom Datorsystemteknik gränsar till andra ämnesområden.

## Styrkor och svagheter

Kvaliteten på forskningen inom Datorsystemteknik i Europa och i Sverige är god och i flera fall världsledande. På Europeanivå har nätverket HiPEAC bidragit till starka grupperingar med samarbeten över nationsgränserna. I Sverige finns det starka och internationellt sett ledande forskargrupperingar inom vissa delområden. Övriga grupperingar saknar till viss del egen kritisk massa och är beroende av samarbeten för att få inflytande. Kommersialisering blir delvis svårare i och med trenden mot vertikala aktörer istället för horisontella där både svenska forskare och småföretag finns. Dock finns det flera exempel på att svenska horisontellt inriktade företag köpts upp och inlemmats i vertikala aktörer.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

### Marknadsmässiga trender

Marknaden för skrivbordsdatorer eller bärbara datorer är vikande och ersätts av nya marknader för smarta inbyggda system, mobila enheter samt storskaliga datacentra. Dessa marknader är på väg mot en konvergens med tillämpningar på global skala där data samlas in från inbyggda system över "Internet-of-things" (IoT), dessa data bearbetas i stora datacentra och kan presenteras på ett kundanpassat sätt till miljontals användare med mobila enheter typ smarta mobiltelefoner, eller för att styra vår omvärld i så kallade "Cyber-Physical Systems" (CPS). För att nå framgång kommer det att vara kritiskt att bemästra komplexiteten i nästa generation av system och tjänster. Mängden analyserbar data ökar nu betydligt snabbare än t.ex. antalet transistorer på ett chip (Moore's lag) och kommer bland annat från IoT, kunddata i sociala medier, genkartläggning med mera, och har blivit en ny kommersiell drivkraft: Big Data.

Marknaden blir också alltmer *vertikal* i och med att globala företag strävar efter att bemästra alla abstraktionsnivåer för sina produkter, från hårdvaruimplementation upp till tjänster för slutanvändare.

## Teknologitrender

Efter att prestanda har varit den drivande kraften har istället energi och effektutveckling blivit den huvudsakligt begränsande faktorn i alla typer av datorsystem. Det kan vara på grund av kostnader för energi och/eller kylning eller på grund av begränsad batterikapacitet i mobila enheter. Halvledarteknologin, som fortfarande karakteriseras av Moores lag med en fördubbling av antal komponenter på ett chip cirka vartannat år, brottas med problem med effektdensitet som gör att bara en minskande bråkdel av alla komponenter kan strömförsörjas vid varje givet ögonblick, något som kallas *mörkt kisel*. Dessa var några av drivkrafterna som tvingade fram flerkärniga processorer för allmänt bruk i mitten av förra decenniet. Detta räcker emellertid inte längre utan forskare och industri undersöker i allt större utsträckning möjligheterna att använda *heterogena datorsystem* som består av komponenter som är speciellt lämpade för olika typer av beräkningar eller databehandling, och när de inte används kan stängas av för att spara energi.

Forskning inom datorarkitektur har i detta sammanhang varit särskilt viktig för att åstadkomma system som kan leverera fortsatt ökad prestanda med minskad effektutveckling. Trots detta är lösningarna hittills sådana att komplexiteten i programvaruutveckling ökat dramatiskt där programmerare i allt större utsträckning behöver förstå och anpassa sina program till olika specialiserade heterogena hårdvaruplattformar. En trend finns inom programmeringsramverk att dölja denna komplexitet i synergi med hårdvaran.

Implementeringstekniker för både processorer och minnen diversifieras i och med att gränsen för traditionell 2D-skallning av CMOS komponenter närmar sig sitt slut. Tredimensionella kretsar och många nya typer av minnestekniker för både flyktiga och icke-flyktiga minnen kommer ställa nya krav på alla områden inom datorsystemteknikforskningen.

Datorsystem som består av storskaliga datacentra är en annan trend som ökar i betydelse i takt med att vi producerar exponentiellt mer data varje år. Ett datacenter kan bestå av några fåtal datornoder upp till hundratusentals noder. Den nu förhärskande programmeringsmodellen för att dessa enorma system ska kunna uppfattas som *ett* datorsystem är MapReduce som introducerades kommersiellt av Google och som nu utvecklas med öppen källkod av forskare och industri under paraplyet Hadoop. Än så länge har skalbarheten nåtts genom att kunna lägga till fler noder men det finns ett stort behov av forskning för att kunna utnyttja enskilda noder bättre liksom programmeringsramverk där heterogenitet tas tillvara och kan utnyttjas.

## Utvecklingstendenser och – potential

I och med utvecklingen går mot heterogena datorsystem – i alla marknader – har behovet av forskning snarare ökat än minskat på alla abstraktionsnivåer. Inom *mikroarkitektur* är behovet av energieffektiva lösningar större än någonsin, samtidigt som enkeltrådsprestanda fortsätter vara viktigt. Behovet av stöd för parallellism i processorer, minnessystem och sammankopplingsnät fortsätter att öka. Inom *exekveringsmodeller* exponeras mer och mer av den underliggande hårdvaran till övre abstraktionsnivåer för största möjliga flexibilitet. Forskningen inom *systemprogramvara* har släpat efter då operativsystem fortfarande använder flera decennier gamla abstraktioner. Dock sker en utveckling inom virtuella maskiner och virtualiseringstekniker. Slutligen finns idag ett stort behov av forskning inom *programmeringsramverk* som döljer komplexiteten hos den heterogena hårdvaran för den stora mängden programvaruutvecklare som bör kunna utveckla program som kan köra även på nästa generations hårdvara, som antagligen har en helt annan exekveringsmodell än dagens. Även storskaliga datacenter blir heterogena och kraven på effektiva programmeringsramverk och operativsystem för hela datacentret ökar.

Behovet för programvaruutvecklare att lättillgängligt förstå hur deras programvara utnyttjar hårdvaran ökar i samma takt som det behövs effektiva programmeringsramverk. Detta leder till ökade krav på *kvantitativa analysmetoder*. Nya tillämpningar, särskilt inom dataintensiva system, leder till andra krav på mikroarkitekturer och exekveringsmodeller än idag och där finns det i dagsläget inga etablerade metoder för att studera dessa tillämpningar på mikroarkitekturnivå.

Det finns en potential för svensk forskning att ytterligare skärpa sin ställning med världsledande resultat. Det finns troligtvis störst möjlighet till inflytande inom följande delområden:

- *Datorarkitektur*: där vi har starka forskargrupper och demonstrerat inflytande till både europeiska som amerikanska aktörer.

- *Systemprogramvara och Programmeringsramverk*: där det finns en stark etablerad forskning och ett stort behov för svensk industri.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Datorsystemteknik är en relativt ung disciplin. Det finns fortfarande ingen given identitet för den på universitet och högskolor utan den brukar förknippas med antingen elektroteknik eller datavetenskap, eller båda två. Helt klart är att det finns behov av forskning som sträcker sig mot båda dessa angränsande områden. Ämnet är starkt etablerat i USA med världsledande forskning på många universitet. Det är också där som de stora tongivande företagen finns, t.ex. Intel, IBM, Oracle, Apple med flera. I Asien är det framförallt Kina och Japan som är tongivande även om det finns spridda insatser i andra länder.

I Europa är ämnet väl representerat i huvudsak genom det EU-finansierade nätverket HiPEAC som engagerar över 1400 forskare och forskarstuderande över Europa. I Sverige finns det 71 medlemmar i HiPEAC.

Kvaliteten på den svenska forskningen är överlag god och världsledande inom vissa grupperingar. Inom datorarkitektur finns det stora och världsledande grupperingar. Forskning om programmeringsramverk är stark på flera håll, och inom plattformar för dataintensiva system finns ytterligare världsledande forskning. En problematik är att vissa av forskningsgrupperna jämfört med motsvarande grupper på de ledande amerikanska universiteterna är relativt små. En finansieringsstruktur som skulle gynna samarbeten har potential att få större genomslag än idag.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Forskningsmetodiken inom datorsystemteknik är experimentell i sin natur. Modeller av datorsystem byggs upp antingen baserade på simulering eller på analytiska modeller. Analytiska modeller används med fördel i en tidig fas för att etablera om ett angreppssätt är meningsfullt. Senare i processen, då hög noggrannhet är av betydelse, utvecklas simuleringsmodeller av det tänkta objektet som kan modellera skeenden i datorsystemet till en noggrannhet ner till klockcykelnivå. Egenskaper som prestanda och energiförbrukning för ett datorsystem etableras typiskt genom mätning för ett stort antal datortillämpningar på dessa simuleringsmodeller. Typiskt tar varje simulering ett dygn i anspråk. För en studie inom ämnet är det inte ovanligt att det behövs flera hundra simuleringar. Ämnet i sig har alltså behov av högpresterande datorer för att utföra den stora mängd simuleringar som krävs för att göra framsteg.

För forskning inom systemprogramvara och programmeringsramverk för storskaliga datacentra finns idag inga etablerade simuleringsmodeller. Istället byggs experimentella datacenterkluster som är miniatyrer av kommersiella anläggningar. Det är osäkert i vilken grad dessa relativt små system motsvarar realistiska installationer.

Forskningen inom programmeringsramverk för storskaliga datacentra har ett liknande problem och behov. Det är oekonomiskt och resurskrävande att för en enskild forskargrupp etablera ett representativt datorkluster. Istället borde ett nationellt kluster etableras med möjlighet till access och tid till alla forskare på ungefär samma sätt som ”Swedish National Infrastructure for Computing” (SNIC) tillhandahåller beräkningskraft för olika ändamål. SNIC’s system används idag för arkitektursimuleringar och fungerar väl för det men de lämpar sig inte för experiment med systemprogramvara på operativsystemsnivå. Ett alternativ kan möjligen vara att, likt exempelvis Google, hoppa över laboratoriefasen och istället göra storskaliga beta-tester i verklig miljö.

## Programvaruteknik

### Beskrivning av forskning inom ämnet

Programvaruteknik omfattar metoder och tekniker för utveckling och underhåll av programvara. Programvaran kan utgöra fristående program, eller vara en del av andra system. Programvaruteknik har en mjuk sida, som studerar metoder för kravanalys, design, organisationer och programvaruutvecklingsprocesser. Den har också en teknikinriktad sida, som omfattar studium av modellering och design, implementering av programvara, dess

verifiering och validering, programvarukvalitet, och konstruktion av verktyg som inkluderar dessa metoder, som modellering och programmeringsspråk. Här tolkar vi begreppet brett, även om vi inte tar hänsyn till samspelet mellan mjukvara och den mänskliga användaren, algoritmer och tillämpningar såsom trådlösa sensornätverk, eftersom dessa ämnen tas upp på annan plats i denna rapport.

## Styrkor och svagheter

Programvaruteknik är ett starkt område. Vad som emellanåt kan framskynta som svagheter har att göra med svårigheten att tillräckligt snabbt möta de hastigt föränderliga yttre förutsättningarna i form av exempelvis hårdvaruutveckling, ökad systemkomplexitet, ökande kvalitetskrav och Big data; se nästa avsnitt.

Sverige är jämförelsevis väl rustat, med bred forskning inom relevanta områden och många internationellt kända forskare. Vissa områden är dock underdimensionerade i förhållande till samhällets behov. Dessa inkluderar metoder och tekniker för de nya paradigmer för mjukvaruutveckling och utveckling av befintlig programvara.

Svensk forskning inom programvaruteknik är stark och mångsidig, med många internationellt kända forskare inom olika områden. De stora universiteten har vart och ett flera starka grupper inom olika områden, och även flera mindre högskolor har starka forskningsmiljöer. Det är dock tydligt att fokus är avgörande för framgång: forskning behöver en kritisk massa för att bli riktigt stark. I vissa områden är forskningen splittrad och behöver större fokus. En risk för programvaruteknisk forskning i Sverige är att programvaruteknik ofta inte ses som ett forskningsområde i sig, utan snarare som en del av andra forskningsområden. Det finns också en tendens till uppdelning mellan grundforskning och tillämpad forskning i separata grupper, vilket riskerar att skapa en klyfta där tillämpad forskning inte använder de nyaste resultaten och grundforskning bedrivs utan insikterna från den verkliga världen.

Totalt sett har Sverige starka forskare inom många viktiga forskningsfält i programvaruteknik. Detta ger möjligheter till ytterligare framsteg inom forskning som bidrar till att lösa samhällsproblem, stödja relaterade forskningsområden, och ytterligare stärka den svenska vetenskapliga positionen i programvaruteknik.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Programvaruteknik står inför många utmaningar i dag, både globalt och i Sverige. Behoven är enorma av produktivitetsoökning och av snabb respons på kontinuerligt föränderliga krav, inklusive programvarukvalitet. Exempel på kvalitetskrav är intrångssäkerhet, integritet, energieffektivitet och funktionssäkerhet.

Vidareutveckling av hårdvara såsom ”multicore CPU”, grafikprocessorer (GPU), och ”Field-Programmable Gate Array” (FPGA) kräver nya paradigmer inom software design och implementering. Globaliseringen kräver nya utvecklingsprocesser, och användning av programvara som tjänster som körs i form av "cloud computing" eller "cyber -physical systems" (CPS) innebär nya utmaningar. Den ökande integrationen och kombinationen av data- och informationsvetenskap leder till utmaningar för utvecklingen av sådana integrerade system, liksom behov av kostnadseffektiv utveckling och kvalitetssäkring av system. Ytterligare andra utmaningar kommer från omdaningar på det upphovsrättsliga området, inte minst intellektuella rättigheter för programspråk.

Datorhårdvara utvecklas i en rasande fart - Moores lag från 1965, som anger att antalet transistorer i ett chip fördubblas ungefär vartannat år, är fortfarande giltigt. Detta möjliggör ständigt nya tillämpningar, och förväntningar stiger i motsvarande grad. På många områden ökar programvarans storlek med en faktor tio per årtionde. På allt fler områden har programvara blivit en dominerande faktor i utvecklingen. Nya områden, som sociala nätverk, vilka drivs av programvara och kommunikationsmöjligheter, blir faktorer att räkna med i all samhällsverksamhet. Medan programvara tidigare var avsedd för beräkning av specifika tekniska och vetenskapliga problem med högt specialiserade användare, används de idag massivt av alla kategorier av människor, vilket reser krav på att göra dem mer användarvänliga, robusta, skalbara och anpassningsbara.

Programvarans ökande del av vår vardag ökar också vår sårbarhet för dåligt fungerande programvara. Kostnaderna för det senare är astronomiska, och i genomsnitt spenderar mjukvaruutvecklare 50 % av sin tid att hitta och korrigera fel. Detta kräver utveckling av metoder som gör färre fel, till exempel kodgenerering från programvarumodeller, återanvändning av existerande komponenter och tjänster, och lösningar som möjliggör

bättre felkontroll. Stora ansträngningar görs också för att utveckla effektivare tekniker för att hitta fel och för att verifiera avsaknaden av fel i programvara. Tekniker som testning, programanalys och formell verifiering har utvecklats snabbt och används nu systematiskt i programmeringsprocesserna hos många ledande programleverantörer.

Programvarukvalitet är en stor utmaning, inte bara "frånvaro av fel", utan också egenskaper som tillförlitlighet, intrångssäkerhet, funktionssäkerhet, prestanda, användarvänlighet, och resursutnyttjandet. Att kunna hantera säkerhet och integritet i en distribuerad global miljö blir en av de viktigaste frågorna. Andra viktiga egenskaper är relaterade till resursutnyttjandet och resursförbrukning. I praktiken testas dessa egenskaper under programvarans exekvering, snarare än som en del av analysen under mjukvarudesign och utveckling. Existerande teorier och metoder är fortfarande inte tillräckligt robusta, skalbara och användbara att kunna allmänt tillämpas i praktiken. Ytterligare forskning inom detta område krävs, i synnerhet när det gäller programevolution och sammansättningen av programvarukomponenter.

Idag byggs i praktiken ingen programvara från grunden. Istället återanvänds en stor mängd programvara, antingen i form av "opportunistisk återanvändning", där källkoden tas och uppdateras manuellt, eller från befintliga komponenter och tjänster, antingen inbyggda i systemen eller som externa tjänster. I ett ad-hoc-återanvändningsprocess kan många okända och implicita antaganden tappas bort, med uppenbara risker. Trots detta är en hel del forskning fokuserad på utveckling från grunden, och tar inte upp återanvändning. Det behövs nya metoder som höjer abstraktionsnivån på så vis att de behandlar programvara som byggstenar i stället för att fokusera på koden.

En stor utmaning i programvaruutveckling är relaterad till det senaste decenniets nya datorarkitekturer. I stället för en enda processor omfattar de flesta exekveringsplattformar flera typer av processorer, som "multi-" och "many-", CPU:er, grafiska bearbetningsenheter (GPU) med hundratals processorkärnor som körs parallellt, och Field-Programmable Gate Array behandlingsenheter (FPGA). Dessa möjliggör en hög grad av parallell exekvering, men för att dra nytta av det behöver programvara ge stöd för parallell programmering, som fortfarande kräver ytterligare utveckling, både på konceptuell nivå och i genomförande. Det krävs för det första att programspråk modifieras eller att nya språk utvecklas i vilka man lättare kan skriva parallella program, för det andra att kompilatorer utvecklas för att producera parallell kod, och att för det tredje att test- och verifieringsmetoder utvecklas så att de effektivt kan hantera parallella program.

En annan form av parallell och distribuerad databehandling är "cloud computing" (datormoln), där exekverandet av ett program distribueras till datorer i ett dynamiskt nätverk, i vilket fördelningen drivs av beräkningsresurstillgänglighet. Många företag flyttar från egna och lokala strukturer till olika arkitekturer för datormoln. Detta genererar flera specifika utmaningar: tillgänglighet, tillförlitlighet (inklusive feltolerans), säkerhet, integritet, prestanda, processoptimering och effektivitet i energianvändningen. Eftersom miljön är mycket dynamisk behövs nya tekniker, baserade på systemmodellering, övervakning och maskininläring.

"Big data" avser utmaningar i samband med effektiva sätt att behandla stora mängder data, ofta i realtid. Här ingår uppgifter att söka, identifiera och extrahera relevanta data för presentation på sätt som möjliggör automatiska beslut och samtidigt hanterar säkerhet, integritet, tillgänglighet och tillförlitlighet.

Programvaran får en avgörande roll i att bygga cyber-physical systems (CPS), som kan ses som en utvidgning av inbyggda system. Medan inbyggda system fokuserar på datorsystem inbäddade i produkter, avser CPS dessutom det fysiska system som styrs, med fokus på samspelet i en distribuerad miljö. Utmaningarna i samband med CPS liknar dem för inbyggda system, det vill säga realtid, pålitlighet och resursförbrukning, med härtill kommer även sådant som autonomi, anpassningsförmåga, processtyrning och distribution.

Vid horisonten kan nya beräkningsparadigmer skönjas, såsom biologiskt inspirerade datorer, naturinspirerade beräkningar (natural computing) och kvantdatorer, vilka alla kan komma att få betydelse och leda till nya utmaningar för programvaruteknik.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Svensk forskning inom programvaruteknik är stark, och i vissa områden är svenska forskare bland de bästa i världen. Svensk forskning i programvaruteknik är väl positionerat i det internationella forskarsamhället. Så till exempel äger under 2014 flera toppkonferenser i programvaruteknik rum i Sverige:

Sverige är mycket starkt i empirisk programvaruteknik – experimentella studier som exempelvis kan gå ut på att studenter får lösa problem med olika metoder och deras resultat jämförs. Det kan också handla om systematiska intervjuer, kartläggningar och fallstudier i företag.

Det finns stark forskning om metodfrågor, till exempel hur man förbereder och prioriterar kraven som ny programvara måste uppfylla. Några svenska forskare inom dessa ämnen är bland de mest citerade i världen, med forskning inom mjukvaruprocesser i kombination med programvaruarkitektur, och rörande metoder för produktion av programvara i form av mjukvaruproduktlinjer.

Svensk mjukvaruindustri är starkt involverad i utveckling av programvaruintensiva system – i fordonsindustrin, automation och telekommunikation. I dessa system behövs programvara inte bara för att beräkna rätt, utan också göra det i rätt tid - i "realtid". Programvaran i dessa system är säkerhetskritisk: allvarliga fel behöver undvikas till i stort sett varje pris. Den snabba ökningen av komplexiteten i programvaran är här en komplikation. Utmaningen är att hitta metoder för utveckling och kvalitetssäkring av denna typ av inbyggd programvara som ger robusta och pålitliga system till acceptabel kostnad. Svensk forskning inom dessa områden är mycket stark och internationellt erkänd, och omfattar analys och design av realtidssystem och inbyggda system i kombination med metoder som komponentbaserad och modellbaserad programvaruteknik för konstruktion och analys av komplexa programvarusystem.

Sverige har en stark forskning kring parallellprogrammering, allt från teoretiska modeller till praktiska verktyg. Ett sätt att hantera parallellism är att använda funktionell programmering, där det svenska inflytandet varit stort, exemplifierat av det svenska deltagandet i skapandet av det välkända språket Haskell, och hur forskare vid Ericsson skapade språket Erlang, vilket växer internationellt som ett språk för Internet-servrar. Vidare har Sverige stark forskning inom andra icke-traditionella programmeringsspråk, som villkorsprogrammering, distribuerade språk, och modelleringsspråk, samt typteori som används för att matematiskt bevisa att programvaran uppfyller sin specifikation.

Vad gäller utveckling av tekniker för att analysera programvara för att hitta fel och verifiera korrekthet har Sverige ett flertal världsledande forskare och grupper. En internationellt uppmärksammat svensk insats är verktyget UPPAAL, som automatiskt kan analysera bland annat realtidsegenskaper för inbyggda datorsystem. En annan, den så kallade Stålmärckmetoden, var en pionjär vad gäller att använda effektiva lösare för satslogik i program- och systemverifiering, något som nu är en ledande metod för att verifiera och kvalitetssäkra kretskonstruktioner hos de ledande hårdvaruleverantörerna. Flera effektiva verktyg för programtestning har utvecklats, såsom Quickcheck, och även för analys av programkod, t.ex. för Erlang.

Kvalitetssäkring av programvara görs oftast genom testning. Här har mycket hänt under de senaste åren, bland annat automatisk generering av testfall som kan upptäcka fel som annars är svåra att hitta. Modellbaserad testning, där testerna genereras från en modell av programvaran, skördar sina första stora framgångar industriellt. Svensk forskning inom detta område är inflytelserik.

Det finns också en hel del forskning om robotteknik, som diskuteras i ett separat avsnitt. Här bör noteras den starka svenska forskningen inom artificiell intelligens (AI), med länkar till robotik och kognition, som utvecklar robotar som kan resonera om sin omgivning, planera sin rörelse, och interagera med människor och andra robotar. Annan svensk AI-forskningen handlar om neurala nätverk och AI-tekniker för beslutsstöd.

Ytterligare områden med framgångsrik svensk forskning inkluderar programmering, kompilatorteknik, programanalys och design av distribuerade system.

## Särskilt behov av forskningsinfrastruktur

Programvarutekniken har inga särskilda områdesspecifika behov av forskningsinfrastruktur.

---

# ELEKTROTEKNIK

---

## Övergripande områdesbeskrivning

Elektroteknik är ett mycket brett ämnesområde, som sträcker sig från kvantberäkningar till radioteknik och forskning om elhybridmotorer för bilar. Bredden på området återspeglar den oerhört genomgripande tekniska utveckling som en gång startade med upptäckten av elektricitet.

Effekterna på vårt samhälle har varit genomgripande och fortfarande syns inget slut på möjligheterna.

Halvledartekniken har haft en explosionsartad utveckling sedan upptäckten av den första transistorn och omsätter idag ofattbara tusen miljarder kronor per år. Fotonik kännetecknas av en hög innovationspotential baserad på nya material och komponentteknologier.

Ur ett globalt perspektiv satsas det relativt litet på halvledarteknik och fotonik i Sverige. Inom vissa delområden bedrivs dock svensk forskning av världsklass. Kvantinformatiken befinner sig fortfarande på grundforskningsstadiet. De stora potentiella vinsterna med kvantdatorer och kvantkommunikation är en stark drivkraft för forskningen och svenska grupper har inom ämnet en stark ställning i Europa.

De tidigare nämnda teknikerna utgör basen för nästa nivå, nämligen forskning om elektronik, sensorik och radioteknik. Detta område har uppvisat en spektakulär utveckling under de senaste 50 åren, som bland annat lett till internet, mobiltelefoni och det uppkopplade samhället.

Denna mycket starka utveckling fortsätter, med en tyngdpunktsförskjutning från komponent- och tillverkningsmekanik till krets- och systemutveckling. Elektroniken blir en allt viktigare komponent inom alla samhällsområden. Av särskild vikt idag är minskning av effektförbrukningen hos elektroniska system, dels för stora system (grön teknik), dels för batteridrivna system (längre batterilivslängd, batterilösa system). Svensk forskning har en stark internationell ställning inom elektronik och radioteknik, men har en ganska smal finansieringsbas som i förlängningen innebär ett hot. Sensoriken kännetecknas av att komplexa sensorer, som datortomografer, radarsystem och ultraljudssystem ständigt förbättras. För enklare sensorer pågår en stark utveckling av trådlösa sensornät och implanterbara medicinska sensorer.

Ytterligare en nivå upp i fråga om spänningar och fysiska dimensioner återfinns ämnet elteknik. Detta ämne har en lång och stark tradition i Sverige av stor betydelse för industrin. Elteknik är för närvarande i en stark tillväxtfas där omställningen av energisystemet och utvecklingen av transport-sektorn är pådrivande faktorer. Introduktionen av nya kraftkällor kräver grundforskning om styrning, drift och planering av elkraftsystem, såväl som nya komponenter, vilket leder till ökat behov av grundforskning om elektromekanisk energiomvandling och högeffektelektronik.

## Elektronik, sensorik och radioteknik

Forskning och utveckling inom elektronikområdet har en stark ställning i Sverige och är av central betydelse för svensk industri. Under de senaste 50 åren har vi sett en dramatisk ökning av prestandan i systemen med skalning av transistorer som drivande faktor. De senaste åren har skalningen mattats av då dimensionerna håller på att nå kritiska gränser. Samtidigt har behoven av förbättrad prestanda ytterligare accelererat samtidigt som effektförbrukningen blir allt viktigare. Kommunikationssystem studeras vid allt högre frekvenser med ökad komplexitet av modulation och det finns visioner om att allt fler maskiner och komponenter kommer att kommunicera på olika sätt. Internationellt finns stora forskningssatsningar som syftar till att integrera nya material (III-V halvledare, 2-dimensionella material etc) på Si-plattformen för att öka transistorprestandan och möjliggöra ytterligare några generationer skalning. En trolig trend är att elektronikområdet framöver kommer att bli mer tvärvetenskapligt för att klara de vetenskapliga och tekniska utmaningarna.

## Beskrivning av forskningen inom ämnet

Det övergripande ämnet elektronik kan delas upp i elektronik, sensorik och radioteknik. Med elektronik avses i första hand informationsbehandlande system som baseras på elektroniska komponenter samt metoder att



konstruera sådana system. De grundläggande komponenternas fysik och teknologi ingår i ”halvledarteknik, fotonik och kvantinformation” och behandlas därför inte, däremot ingår integrerade kretsar, som betraktas som elektronisksystem. I ämnet ingår det fysiska utförandet av datorsystem och kommunikationssystem, medan dessa systems principiella uppbyggnad ingår i datorarkitektur och kommunikationssystem. Renodlad kraftelektronik, avsedd för höga effekter (mer än 1kW) ingår i elteknik. Konstruktionsmetoder ingår, inklusive datorstöd för sådan konstruktion. Sensorik omfattar två typer av sensorer, dels fysiska sensorer som sensorer för tryck, temperatur etcetera, dels sensorsystem som bildsensorer, radarsystem, röntgensystem, etcetera. Radioteknik omfattar i första hand vågutbredning (radiokanalen), antenner, högfrekvensteknik och analog signalbehandling, medan algoritmer och programvara för radiosystem ingår i ”signaler och system”.

## Styrkor och svagheter

Elektronikområdet har uppvisat en spektakulär utveckling under de föregående 50 åren, starkt präglad av Moores lag, det vill säga av en mycket snabb ökning av den integrerade kretsarnas komplexitet och prestanda genom ständigt minskande dimensioner hos de ingående elementen. Denna spektakulära utveckling av grundtekniken har möjliggjort en mycket stark utveckling av data- och kommunikationsteknik, som på senare år bland annat lett till internet, mobiltelefoni och det uppkopplade samhället. Svensk elektronikforskning är internationellt stark med en kraftig koppling till svensk industri vilket bidrar till att behålla konkurrenskraft och skapa jobb. Forskningen har bidragit till att skapa flera SMEs vid olika lärosäten som bidrar till det industriella ekosystemet. Långsiktig finansiering är central för området. Möjligheten att tillverka kretsar via internationella foundries eller vid lokala renrum är en styrka som behöver behållas även i kommande teknologigenerationer.

Idag kan vi observera en successiv avmattning av Moores lag, genom att vi närmar oss de fysikaliska gränserna för elementens storlek, varvid vinsterna vid fortsatt minskning av dimensionerna avtar. Detta innebär att utvecklingen inom traditionell komponentfysik minskar till förmån för utvecklingen inom integrerade elektronisksystem, tex i form av System on Chip. Unika materialegenskaper används dock för komponenter med stor betydelse inom speciella områden, såsom mycket höga frekvenser eller höga spänningar. Kopplingen mellan systemspecifikationer och komponentegenskaper är viktiga i denna utveckling.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

I samband med avmattningen av Moore's lag ser vi en ökad specialisering av tillverkningsprocesserna för varje specifik applikation. Si-baserad teknologi kommer med all säkerhet att behålla sin dominerande ställning medan III-V teknologier kommer att fortsätta att vara attraktiva för högpresterande system. GaN-teknologi håller på att mogna och användas för allt fler applikationer, t.ex. för höga effekter för frekvenser upp till och över 100 GHz. Även inom Si-teknologin kommer material-integration att vara allt viktigare för att realisera de mest skalade teknologieran. Vi kan förvänta oss att se mer av post-CMOS teknologier där ”device/circuit co-design” blir central för att uppnå prestanda t.ex. relaterat till III-V CMOS teknologi, TunnelFETs och 2D material (t.ex. grafen). Det finns här stor forskningspotential och goda möjligheter för nya produkter även om det idag ännu är oklart vilka delar av elektronikområdet som kommer att ha störst påverkan.

Vi ser en expansion av forskningen inom komplexa elektronisksystem och konstruktion av dessa, vilket leder till nya produkter och system baserade på elektronik. Av särskild vikt idag är minskning av effektförbrukningen hos elektronisksystem, dels för stora system (grön teknik), dels för batteridrivna system (längre batterilivslängd, batterilösa system), tex relaterat till ”Internet of Things”. Samtidigt ökar behoven av kapacitet och prestanda från data- och kommunikationsområdena. Forskningen utvecklas därför starkt inom områden som elektronik med låg eller ultralåg effektförbrukning, elektronik för höga frekvenser och höga hastigheter, effektiva arkitekturer baserade på flera kärnor, applikationsspecifika signalbehandlingsarkitekturer, konfigurerbarhet, samt optimeringsmetoder vid konstruktion och under drift. Energieffektivitet är central och då framtida kapacitetsökning inte endast kan uppnås via skalning av transistorteknologier ser vi ett ökat behov av tvärvetenskapliga angreppssätt, med starkare koppling mellan informationsteori, datorarkitektur samt dess implementering i hårdvaran.

Inom sensoriken har de elektroniska kamerorna utvecklats mycket snabbt på senare tid, och helt konkurrerat ut den fotografiska filmen. Denna utveckling kompletteras nu med billiga värmekameror. Andra sensorsystem, som till exempel datortomografer, radarsystem, ultraljudsystem, etcetera förbättras ständigt med hjälp av elektronik-, algoritm- och materialutveckling. Sensorer för avbildning med hjälp av THz-signaler (mm-vågor) är ett etablerat forskningsområde där metoder för integration och byggsätt behöver utvecklas och optimeras. Vi ser också en stark utveckling inom områdena trådlösa sensornät och implanterbara medicinska sensorer där "energy harvesting" kan bli central för lokal energiförsörjning. Radiotekniken har utvecklats mycket snabbt under de senaste decennierna, i samband med mobiltelefonens mycket snabba utveckling. Detta har gett mycket starka avtryck i forskningen världen över, där stora delar av den traditionella kretstekniska och mikrovågstekniska forskningen har övergått till radiosystem och radiokretsar. De snabbt ökande kraven på den digitala signalbehandlingen i dessa system har också lett till stor aktivitet inom signalbehandlande system. Inte minst är högre datahastigheter hos trådlösa nät en viktig trend, liksom radiosystem med högre flexibilitet (multipla band, multipla vågformer) och radiosystem med extremt låg effektförbrukning. Vi observerar en stark expansion av forskningen inom många områden relaterade till höga frekvenser, radio och radar. Inom vågutbredning och antenner studeras radiokanalens egenskaper och man utvecklar nya antensystem, inklusive multipla antenner (MIMO), integrerade antenner och komponenter som utnyttjar så kallade metamaterial (artificiella material). Utvecklingen går mot högre bärvågsfrekvenser och större bandbredder, inklusive THz-teknik. Radioelektroniken utvecklas mot effektförstärkare med högre verkningsgrad och hög linjäritet, radiofrekvenslösningar för större flexibilitet (mjukvaruradio, SDR), radiosystem med ultralåg effektförbrukning, samt nya strukturer baserade på bland annat MEMS-teknik såsom resonatorer och filter. Inom det digitala området utvecklas nya signalbehandlingsarkitekturer som tillåter flexibilitet (programmerbarhet, multistandardssystem, SDR) tillsammans med låg effektförbrukning. Generellt flyttas allt mer mot den digitala domänen medan den analoga delen fortfarande har nyckelfunktioner i blocken.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Svensk forskning inom området har av tradition en mycket stark ställning internationellt. Verksamhet vid flera universitet och högskolor har internationell lyskraft inom flera delområden med stor aktivitet inom relevanta internationella konferenser samt god publicering i ledande journaler. Det finns i Sverige flera starka forskningsmiljöer vid olika lärosäten. Samtidigt finns en mycket stark koppling till svensk systemindustri, vilket ger ytterligare kredibilitet där svensk industri är avnämare av forskningsresultat och rekryterar en stor del av de forskarutbildade. Flera gemensamma forsknings- och utvecklingsprojekt genomförs mellan svensk industri och svenska lärosäten där demonstratorer ger ytterligare visibilitet på den internationella arenan.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Elektronik, sensorik och radioteknik utnyttjar idag nationella laboratorier för komponent- och kretstillverkning (renrum, inom ramen för ett nationellt samarbete, Myfab), särskilt för III-V elektronik. Dessutom utnyttjar elektronikforskningen starkt en europeisk infrastruktur för tillverkning av experimentella integrerade kretsar i kommersiella produktionsanläggningar. I Europa utnyttjas dels en service av Europractice, som är EU-sponsrat. Europractice förmedlar även professionella CAD-system (programsystem för datorstödd konstruktion) till europeiska universitet. MAX-IV och även ESS kommer att erbjuda goda möjligheter för karakterisering av material och komponenter av relevans för post-CMOS teknologier, vilket kommer att vara en styrka för svensk forskning.

# Elteknik

## Beskrivning av forskningen inom ämnet

Elteknik har sin grund i elektriska och magnetiska fenomen vilka teoretiskt beskrivs av Maxwells ekvationer. Elektricitetens flexibilitet som energikälla betyder att den används i ett brett sammanhang som: transport, industri, uppvärmning, ljus, kommunikation och beräkning. Elkraftteknik är den teknik som används för att utforma ett elkraftsystem för att producera, överföra, distribuera och använda elektricitet och utgör därmed huvudområde inom eltekniken.

Forskningsområden inom elteknik har traditionellt utgått från olika områden för elkraftteknik med en stark koppling till materialvetenskap. Allt mer komplexa eltekniksystem och ny teknikutveckling har lett till forskning med metoder från: exempelvis informations- och kommunikationsteknik, regler och styrteknik, matematisk statistik, optimeringslära och systemteknik. Centrala verktyg för forskningen ligger i simuleringsverktyg och scenarioarbete. Summerande kan forskningsområden inom elteknik indelas i områden inom:

- Elkraftsystem
- Elkraftkomponenter
- Elektromagnetiska system
- Elektromekanisk energiomvandling
- Högeffektelektronik
- Elektrifierade transportsystem

## Styrkor och svagheter

En generell styrka inom forskningsområdet Elteknik är dess tydliga koppling till behovet av elektricitet, och en ständig utveckling i strävan mot effektivisering och maximalt användande av resurser med en minimal inverkan på dess omgivning.

Sverige har en väletablerad forskning på hög internationell nivå inom traditionella områden för elteknik. Vad som utmärker Sverige är att forskning och utbildning har en stor bredd. Den täcker in de områden vilka listas ovan och utöver detta finns ett nära utbyte med lokal industri. Det är få länder som exempelvis kan erbjuda en internationell masterutbildning inom hela bredden av elkraftområdet och dessutom möjlighet till praktik inom tillverkningsindustrin. Sverige har en lång tradition av nära samarbete mellan olika aktörer inom elteknik där statliga bolag historiskt har prövat ny teknik och därmed bidragit till svensk teknikutveckling och ny kunskap inom forskningen.

En grundläggande svaghet för Sverige, liksom andra länder i liknande storlek, är en begränsning av ekonomiska och personella resurser. Begränsning av ekonomiska resurser ger en svaghet i att ge tillräckligt stöd till etablerade forskare för att kunna konkurrera med internationella forskningsmiljöer, samt en brist på tydliga karriärmöjligheter för yngre forskare. Vidare innebär ekonomiska begränsningar att bredd måste avvägas mot djup, där Sverige traditionellt har haft en policy att sprida ut resurser istället för att fokusera satsningar till färre starka forskningsmiljöer med spetskompetens. Bristen i personella resurser leder till en brist i rörlighet och förnyelse. Den senaste tidens intensiva utveckling inom området för elteknik med exempelvis stora investeringsprojekt, har minskat personella tillgängliga resurser för engagemang inom forskning och utveckling.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Utvecklingen inom elteknik har senaste åren haft en stark global tillväxt med drivkraft i omställningen av energisystemet mot uthålliga energilösningar och energi- och klimatmål. Speciellt innebär detta en ökning av el genererad från förnyelsebara energikällor som vind och sol, minskning av fossila bränslen, samt energieffektivisering. Denna omställning av energisystemet har i sig resulterat i nya utmaningar inom området för elteknik exempelvis i elöverföringsnätet och balanshantering av kortsiktigt varierande elproduktion och

större mängd distribuerad elproduktion. Begreppet smarta elnät har införts vilket beskriver denna utveckling. Ett omfattande internationellt samarbete och utbyte inom området sker exempelvis genom International Smart Grid Action Network (ISGAN), yrkesnätverket och publiceringsorganet IEEE, samt inom Europa med stora satsningar på gemensamma forsknings- och utvecklingsprojekt exempelvis EIT KIC InnoEnergy där Sverige leder det tematiska forskningsområdet inom smarta elnät och energilagring.

Forskningsområdet för elteknik vidgas med denna utvecklingstrend till att innefatta ett brett område från: kraftelektronik, ny teknik i transmissions- distributionsnätet, energilagring, nya produkter och tjänster baserade på informationsteknik, kunskap om energiflöden och styrmöjligheter hos energianvändare. Utvecklingstrender inom elkraftsystemet går mot integrering med energi- och transportsystemet. Vidare finns en stark trend mot decentralisering av elproduktion liksom styrning i elkraftsystemet, där el-användaren även kan vara elproducent vilket resulterar i nya behov av tekniker för energilagring. Generellt är fokus större på beteendefrågor och användning av elektricitet. Gemensamt för utvecklingen inom elteknik är ett större behov av information- och datahantering. Ett forskningsområde på stark framväxt är data-analys och det finns starka utökade behov av standardisering och interoperabilitet. Exempel på trender och utvecklingsområden inom elteknik inom olika forskningsområden ges enligt följande:

### Elkraftsystemet

En övergripande trend är nya möjligheter för mätning och styrning exempelvis med; fasmätningseenheter (Phasor Measurements Units), generellt placerade i transmissionsnätet, vilka ger mätvärden för spänning och ström upp till 30-120 gånger per sekund, eller smarta mätare placerade hos slutkonsumenten, vilken möjliggör integrering av egen småskaligt producerad el exempelvis från solceller, energilagring exempelvis från elfordon och generell distribuerad styrning av energianvändning.

Utöver komplexiteten i teknisksystemet går trenden mot en alltmer komplexitet i reglerings- och marknadsmodeller, och nya aktörer för drift och planering exempelvis Google som investerar i solenergianläggningar, transmission av el liksom utveckling av elfordon.

Teknikutvecklingen har lett till genombrott exempelvis med uppfinningen av likströmsbrytaren vilken möjliggör ett maskat elkraftnät med både likström och växelström.

### Elkraftkomponenter

Utvecklingstrend inom elkraftkomponenter går mot design av kiselbaserade kraftkomponenter som tyristorer och krafttransistorer och andra halvledarmaterial. Vidare är ett forskningsområde inom nya material för isolering av högspänningsapparater där idag forskning sker inom polymera material för isolering av högspänningsapparater och särskilt för dc-system. En annan trend är utveckling av diagnostiska mättekniker för bedömning av isoleringstillstånd och prediktion av livstid, och nya metoder för tillståndskontroll exempelvis med sensornätverk.

Simuleringsverktyg inom eltekniken används alltmer exempelvis; simulering av elektrofysikaliska fenomen i dielektrikum.

### Elektromagnetiska system, elektromekanisk energiomvandling och högeffektelektronik

Utvecklingen inom roterande maskiner och drivsystem och elektrisk traktion och annan elektromekanisk energiomvandling, syftar generellt till minskade förluster. Exempel på utvecklingstrend inom elektriska maskiner och drivsystem är möjligheter till motorstyrning för energieffektivisering vilket möjliggjorts av ny kraftelektronik. Vidare leder införandet av distribuerade elproduktionsutrustningar till nya krav på utveckling och konstruktion av generatorer och transformatorer, samt på kunskap om samverkan med elnätet.

Effektivisering av elektromekanisk energiomvandling har en utvecklingstrend i användande av nya material exempelvis sällsynta jordartsmagneter, och genom utveckling av nya generatorer och motorer exempelvis med supraledare. En annan trend inom generering är utveckling av teknik och metodik för drift med variabelt varvtal med fulleffektomriktare, denna teknik ger större styrbarhet och förväntas användas i nästa generation vindkraftturbiner. Denna utveckling har möjliggjorts av ny kraftelektronik som resulterat i kostnadseffektiva

frekvensomriktare. Utvecklingstrender innefattar utveckling av högfrekvens-switchar med integration mot både motor och andra belastningar, och exempelvis olika hvdc -applikationer som möjligheter för hur vindkraften tekniskt ska kunna integreras med existerande elnät.

### Elektrifiering inom transportsektorn

Utveckling mot elektriska vägar innebär nya behov av forskning inom en rad områden som exempelvis robusta, säkra och effektiva överföringstekniker mellan infrastruktur och fordon. Exempel på utvecklingsområden inom el och hybridbilar ges av; energieffektivitet både för framdrivning och för energiomvandling i fordonet, integrerad framdrivning och ladd-enheter, strömförsörjning, fordonsanpassad kraftelektronik, storskalig användning av ladd-hybridfordon, och anslutning till nät. Vidare ställer elektrifierade drivlinor ett antal säkerhetsrelaterade krav på teknologi som elsäkerhet i överföringen och i fordonets el-arkitektur, samt på funktionell säkerhet och EMI/EMC interaktion med andra styrsystem i fordon och infrastrukturer.

### Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Sverige har en stark industriell tradition inom elteknik med ett välfungerande utbyggt elkraftsystem och elektrifierad järnväg. Sverige ligger även långt framme inom utveckling av energieffektivitet inom uppvärmning och ljus. Speciellt har Sverige en traditionellt stark ställning inom elkraftteknikområdet med ett elnät som uppfyller högt ställda krav på t.ex. tillförlitlighet och med ett flertal världsledande tillverkare inom elkraftindustrin.

Sverige har liksom flera andra länder en utmaning i att locka ungdomar till ingenjörsvetenskapen och skapa samhällsintresse. Intresset för ämnet Elteknik har dock ökat under de senaste åren både i Sverige och internationellt. Detta är troligen beroende på växande uppmärksamhet för energi- och miljöfrågor samt ett generationsskifte som resulterat i ett stort behov av nyrekryteringar.

Elteknikens ställning som forskningsområde förväntas stärkas i Sverige liksom i världen som ett resultat av ett ökat behov av lösningar inom energi och transportområdet där elteknik är ett nyckelområde.

### Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Det saknas en nationell forskningsinfrastruktur inom elteknik i Sverige. Exempelvis har de traditionella miljöerna inom elkraftteknik vid KTH och Chalmers båda sedan slutet av 90-talet fått stänga ner sina högspänningshallar på grund av brist på resurser för laborativ verksamhet. Ett generellt problem är att det saknas ekonomiskt täckning i utbildning och forskningssystemet för laborativ verksamhet.

Behovet av infrastruktur för forskning och utveckling inom elteknik är stort, och ökar med pågående utvecklingstrender. Ett exempel på behov är möjlighet till realtidssimulering för att möjliggöra forskning inom nya metoder för hantering av elkraftsystemet. Senaste årens satsningar inom smarta elnät har dock inneburit tre större nationella demonstrationsprojekt inom smarta elnät med finansiering från Energimyndigheten och industrin; Norra Djurgårdsstaden i Stockholm, Hyllie i Malmö samt på Gotland. Dessa projekt ger värdefulla bidrag till forskningen med tillgång till data och praktisk erfarenhet.

En nationell gemensam forskningsinfrastruktur skulle möjliggöra ett viktigt kunskapsutbyte mellan forskningsmiljöer, en möjlighet till samordning av verksamhet och fokusering.

## Halvledarteknik, fotonik och kvantinformation

### Beskrivning av forskning inom ämnet

Det finns ett stort överlapp mellan halvledarteknik, fotonik och kvantinformation och verksamheter som i ämnesöversikten sorterar under Fysik, Materialvetenskap, Tillämpad fysik m fl. Detta gör att det knappast går inte att göra en stringent gränsdragning för vilka delar av området som bäst sorterar under rubriken

Elektroteknik. Områdena halvledarteknik, fotonik och kvantinformation överlappar också väsentligt med varandra. Halvledarlasrar, lysdioder och solceller är till exempel klassiska fotonikkomponenter som typiskt bygger på halvledare och halvledarteknik.

#### Halvledarteknik

Vi förefaller närma oss en fysikalisk gräns för kiselbaserad halvledarteknologi. På ett globalt plan har detta sporrat till stora forskningsinsatser för att hitta alternativa halvledarmaterial och teknologier som kan ersätta och komplettera dagens kiselteknologi.

#### Fotonik

Fotonik är en sammanfattande benämning för tekniker och metoder där ljus utnyttjas. Fotonik kännetecknas av en hög innovationspotential och vilar såväl på nya fotoniska material och komponentteknologier som mer grundläggande områden, ofta relaterat till ljus-materia växelverkan.

#### Kvantinformation

Inom kvantinformationsområdet utvecklas metoder som utnyttjar kvantmekanikens inneboende egenskaper för att hantera information på ett effektivare sätt än vad som är möjligt med klassiska metoder. Fältet befinner sig för närvarande helt övervägande på grundforskningsstadiet.

### Styrkor och svagheter

Den material- och komponentrelaterade forskningen inom samtliga tre fält har ett stort behov av högkvalitativ infrastruktur. Innovationer och utveckling av nya material och komponentteknologier är starkt beroende av faciliteter där material och materialstrukturer kan syntetiseras och där komponenter och kretsar kan tillverkas med hög precision, gott utbyte och god reproducerbarhet. Detta kräver god tillgång till såväl renrum med modern utrustning för epitaxi och tillverkningsprocesser som avancerade mätfaciliteter för analys av halvledar- eller fotoniska material, komponenter och kretsar. Samtidigt måste avvägningen mellan den material- och komponentrelaterade forskningen och övriga områden beaktas.

Vad gäller infrastruktur står Sverige genom MyFab utrustningsmässigt väl rustat i ett europeiskt perspektiv. Infrastrukturen är genomgående av konkurrenskraftig kvalitet och ger ett gott stöd för projekten (se dock även stycket om infrastrukturbehov). För de delar av forskningsområdena som inte nyttjar den typ av utrustning som finns inom MyFab är situationen delvis annorlunda, vilket diskuteras kort i stycket om infrastrukturbehov.

Forskningsfältens närhet till teknologin gör att det finns en hel del top-down satsningar med strategiska medel. Det är viktigt att det också finns en matchning med bottom-up medel för att behålla en kreativ nytänkande utveckling.

#### Halvledarteknik

Forskning inom halvledarteknik och halvledarmaterial är av strategisk betydelse. Halvledarteknologin har möjliggjort ett otal andra teknologier som har förändrat flera aspekter (energi, forskning, ekonomi, kommunikation) av vårt samhälle i grunden. Det samlade ekonomiska värdet av dagens halvledarindustri är omkring tvåtusen miljarder kronor. Det finns inom EU starka teknikplattformar (ENIAC för nanoelektronik, ARTEMIS för inbäddade datorer) inom området. Svensk industri är inte representerat inom alla områden men forskningen genererar ett antal spin-off företag.

#### Fotonik

Då fotonik används i allt högre grad inom alla områden ökar dess ekonomiska värde snabbt. Fotonik anses på ett väsentligt sätt kunna bidra med lösningar till problem relaterade till stora samhällseliga förändringar och utmaningar. Dessutom befinner sig utvecklingen i delar i ett relativt tidigt skede så att fundamentala fysikaliska begränsningar i många avseenden är avlägsna. Området karakteriseras därför av stor innovationspotential och

upptäckter och uppfinningar av stor framtida betydelse kan förväntas. Fotonik är av EU-kommissionen klassad som en av sex ”key enabling technologies” och för fotonikområdet finns den europeiska teknikplattformen Photonics21. Verksamheterna under fotonikområdet sorterar i delar även under olika fysikgrenar (atom-och molekylfysik, kondenserad materia, teknisk fysik) och man kan överväga om en samlad behandling av området ur forskningsfinansieringssynpunkt skulle vara värdefull för utvecklingen.

#### Kvantinformation

Fältet expanderar kraftigt och det byggs upp en stor internationell aktivitet. Flödet av nya idéer och tekniker är mycket stort. Den starka grundforskningskaraktären gör att uthållighet parat med välavvägda prioriteringar sannolikt är en god strategi i nuläget.

### Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

#### Halvledarteknik

Trenden för halvledarteknikforskningen går mot material och teknologier som kan komplettera (/ersätta) kisel. Då många av de nya halvledarmaterialen inte är kompatibla med existerande kiselteknologi följs halvledarmaterialforskningen också av utveckling av nya processmetoder och integration av icke-kiselmateriäl med existerande kiselteknologi, t ex genom bondning eller epitaxi. Nanostrukturerade material och nanotrådteknologi (alltifrån grundforskning utnyttjande kvantmekaniska egenskaper när halvledarstrukturer krymper till nanonivå, till nya lösningar, idéer och tillämpningar inom material, energi eller medicin) har ökat kraftigt. Material med stora bandgap (för fotonik och högeffektelektronik) eller små bandgap för lägre energikonsumtion (t ex Ge på kisel eller tunneleffekttransistorer (TFET)), molekylär och organisk elektronik, tryckbar elektronik där kretsar framställs med vanliga tryckpressar och självbyggande (self assembling) system där elektroniska kretsar bildas spontant, biokompatibla elektroniska halvledare, litografisk framställning av nanokomponenter och mikromekaniska strukturer är andra forskningstrender.

#### Fotonik

Ständig, billig uppkoppling av människor och produkter driver fram nya beteenden och marknader. Den avmattning av ökningen av kiselprocessorkapaciteten som förefaller finnas öppnar för områden som ljusemitterande och ljusabsorberande material på kisel, fibres-to-the-chip, kommunikation mellan processorer via ljus. Vi ser en utveckling från GHz mot THz (höghastighetskommunikation), mot mid IR, THz ljuskällor (kvantkaskadlar) och free space kommunikation. Inom spektroskopi och ljus-materia växelverkan ser vi en utveckling mot högre effekter, kortare pulser och ökad frekvensavstämbbarhet.

I gränsområdet kvantoptik och kvantinformation växer, delvis i symbios med nanofotoniken, området kvantfotonik fram med komponenter utnyttjande kvantmekaniska fenomen för detektion, avbildning, metrologi mm.

#### Kvantinformation

Många nationer (Japan, Australien, Singapore, Kina, Canada, USA m fl) gör stora satsningar på kvantteknologi genom bildandet av nationella centrum eller kluster inom området. Inom kvantdatorområdet ställs höga resurs- och teknologikrav när komplexiteten på systemen ökas, vilket driver den tekniska utvecklingen framåt. Inom kvantkommunikation görs satsningar mot satellitkommunikation.

Mycket forskning är inriktad på grundläggande effekter hos sammanflätning, dekoherens och kvantmätprocesser där alltmer avancerade tester görs av kvantmekanikens grunder. Sammanflätade tillstånd med flera partiklar används rutinmässigt. Interaktion mellan materia och ljus, där fotoner fås att växelverka med både naturliga atomer och artificiella atomer, studeras intensivt. Kontroll på den kvantmekaniska nivån är central för fältet, kvantinformation konverteras mellan olika system och alltmer komplicerade tillstånd genereras. Allteftersom kontrollen ökar kan vi förvänta oss en ökning av möjliga teknologiska tillämpningar.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

### Halvledarteknik

Starka verksamheter i Sverige finns bland annat när det gäller nanostrukturerade material och nanotrådsteknologi, hybridmaterial t ex integrerade på kisel, material med stora bandgap (t ex GaN, SiC), nanoelektronik och grafen.

### Fotonik

I Sverige finns starka verksamheter inom t ex solcellsforskning, kvantoptik, biofotonik, fiberoptisk kommunikation, spektroskopi och optisk diagnostik (t ex kopplat till förbränning). Liksom när det gäller fotonikmaterial och materialstrukturer (inklusive nanofotonik) fotoniska komponenter (för optisk kommunikation eller baserade på icke-linjär optik, lysdioder i nya material mm), metamaterial och ytplasmoner.

### Kvantinformation

Sverige har en förhållandevis stark ställning i Europa med flera EU-projekt koordinerade av svenska forskare. Experimentell forskning bedrivs inom kvantkommunikation, kvantdatorkoncept baserade på supraledande kretsar eller kristaller dopande med sällsynta jordartsmetaller och på test av kvantmekanikens grunder. Teoriverksamheten inkluderar studier av grundläggande effekter kring sammanflätning, dekoherens och kvantmätprocesser.

### Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

En diskussion kring infrastruktur gjordes under rubriken ”Styrkor och svagheter” där det konstaterades att inom den material- och komponentrelaterade forskningen står Sverige utrustningsmässigt förhållandevis väl rustad genom Myfab. Svårigheten rör snarare driften av utrustningen än själva utrustningen. Med en hög utnyttjandegrad kan en nyttjandeavgift tänkas ge ett inte försumbart stöd till driften men även i övrigt behöver driftkostnadsfrågan beaktas.

Vad gäller övrig infrastruktur vilken inte tillgodoses genom nationella anläggningar är behovet störst av olika slag av mätutrustning. Medan sådan tidigare huvudsakligen täcktes genom externa finansiärer är tanken nu att detta skall täckas av universiteten själva. Detta är en relativt stor förändring eftersom de externa finansiärerna huvudsakligen gjorde urvalet baserat på projektqualité, medan universiteten ofta som primärt urvalsinstrument har antalet användare som planeras nyttja utrustningen.



## Övergripande områdesbeskrivning

I avsnitten nedan beskrivs kortfattat mål och villkor för forskningen inom fysik- och astronomiämnenas huvudsakliga delområden och en bild av den svenska forskningens ställning i ett internationellt perspektiv ges. De delområden som beskrivs är astronomi, astro- och rymdfysik, subatomär fysik, atom- och molekylfysik, fusions- och plasmafysik, den kondenserade materiens fysik, samt teoretisk och matematisk fysik. Den teoretiska fysiken kommer in i var och en av beskrivningarna men har även en övergripande karaktär med delvis gemensam teoribyggnad och villkor som till stora delar särskiljer sig från den experimentella fysikens.

Den fysik och astronomiforskning som behandlas här har nästan uteslutande en tydlig grundforskningskaraktär där målet är att förbättra och utvidga kunskapen om universum och materiens uppbyggnad och dynamik på en för frågeställningen lämplig detaljnivå. Den vunna förståelsen kan sedan användas för att utveckla samhällsnyttiga tillämpningar vilket ofta, men inte alltid, sker i många steg och på långa tidsskalor. Exempel här är alltmer småskalig elektronik i våra datorer och mobiltelefoner, GPS, batterier med bättre prestanda, pekskärmar, supraleddare, laserövervakning av luftföroreningar och industriutsläpp, solceller, diagnostik (positronemissionstomografi, PET och datortomografi, CT) och behandling av vissa typer av tumörsjukdomar (proton- och lättjonterapi). Det viktiga är dock att dessa tillämpningar sällan eller aldrig varit målet för forskningen i det första steget utan fokus har varit på den grundläggande kunskapsuppbyggnaden. Ett undantag är fusionsplasmafysiken som har som tydligt slutmål att bidra till realiserandet av kommersiellt livskraftiga fusionsreaktorer.

Forskning inom astronomiområdet bygger traditionellt på ett nära samspel mellan alltmer förfinade observationer och modellutveckling som huvudsakligen bygger på känd fysik samtidigt som upptäckter inom astronomin också kan leda till ny fysik. Verifiering genom laboratorieexperiment spelar här en viktig roll – ett exempel är den första identifikationen av negativt laddade molekylära joner i universum som kunde säkras genom att jämföra noggranna spektroskopiska undersökningar av kolkedjemolekyler i laboratoriet med observationsdata. Det finns även ett nära samarbete med rymdfysiken där nya landvinningar bidrar till en ökad förståelse av olika astronomiska objekt som till exempel exoplaneter.

Alltmer förfinad instrumentering är helt oundgänglig för fysiken och ger förutsättningar för mer detaljerade experiment och experiment i parameterområden som inte varit tillgängliga tidigare. Vid LHC (Large Hadron Collider) på CERN kunde man nyligen nå sådana energier att Higgs-partikeln kunde påvisas. En del av partikel- och astrofysiken fokuserar nu på att försöka förklara den mörka materians och den mörka energins egenskaper och ursprung. För astronomer, kärn- och partikelfysiker och för fusionsplasmafysiker är medlemskap i ledande internationella samarbetsorganisationer (ESO, ESA, FAIR, CERN, ITER) helt nödvändiga eftersom de ger tillgång till den mest avancerade utrustningen. Rymdfysiken å sin sida utnyttjar stora rymdfarkoster och avancerad instrumentering för att utforska solsystemets egenskaper i detalj. Den kondenserade materiens fysik och atom- och molekylfysiken kommer att använda MAX IV flitigt. För det senare området kommer DESIREE-anläggningen i Stockholm också att vara viktig. Det finns förutsättningar för att ESS i framtiden kan komma att spela en viktig roll för svensk fysikforskning och främst då för den kondenserade materiens fysik men möjligen kan även vissa specialstudier inom subatomär fysik komma att ske vid ESS. I dagsläget är erfarenheten av neutronspredningsexperiment ganska begränsad i landet. ESS är ett mycket kostsamt nytt initiativ och det är viktigt att dess huvudsakliga finansiering isoleras från vetenskapsrådets övriga forskningsstöd på det sätt som utlovats av regeringen. Samtliga delfält inom fysiken arbetar med modellering och tillgång till kraftfulla beräkningsresurser som de som tillhandahålls av SNIC är avgörande

Svensk forskning inom fysik och astronomi är internationellt framstående. Trots att ett litet land som Sverige inte kan ha heltäckande verksamhet inom alla delområden återfinns svenska forskare vid eller nära den internationella fronten inom alla de delområden som beskrivs nedan. Ett exempel bland flera är attosekundfysiken där man nu kan studera vågfunktionens dynamiska förändring under en elektronisk övergång i en atom – här är det klart att svenska forskare är med och leder den internationella utvecklingen. Men förutsättningarna för fysik- och astronomiforskningen kan förbättras på flera punkter till exempel genom:

i, En prioritering av grundforskning för vilken Vetenskapsrådet ofta är den enda möjliga nationella anslagsgivaren;

ii, En samordning av forskarrekrutering mellan universitet och forskningsråd - till exempel när det gäller vetenskapsrådets projektstöd till unga forskare och universitetens rekrytering via "tenure-track" tjänster. Ett system med tjänster liknande de tidigare särskilda forskartjänsterna men med breda utlysningar av intresse för flertalet universitet är också en möjlig åtgärd. Detta skulle kunna ses som ett komplement till de nya anslagsformerna för internationellt excellenta forskare, rådsprofessorer och unga excellenta forskare som fokuserar mycket på personliga meriter och inte ger utrymme för strategiska satsningar på specifika (men brett definierade) forskningsområden.

iii, Deltagande i stora experimentella projekt (vid t.ex. CERN) kräver ofta långa planeringsperspektiv och innefattar ofta krav på deltagande forskare bidrag till drift och underhåll av utrustning. En möjlighet kunde vara att erbjuda längre löptider för projekt med sådana randvillkor.

iv, För gruppen teoretiska och matematiska fysiker kunde möjligheten att bevilja något mindre (men fler) projektanslag än de typiska vara av nytta. Detta skulle även gagna svensk fysikforskning i stort eftersom genombrotten där ofta kommer från enskilda forskare – vilka dessa kommer att bli är förstås utomordentligt svårt att förutse.

v, Avancerad instrumentutveckling är central för fysiken och astronomin. Ett problem är att de forskare som engagerar sig i sådan verksamhet får en meriteringsprofil som avviker från den typiska med färre publikationer, färre handledda doktorander och postdoktorer etcetera. I samband med bedömningar av vetenskapliga meriter vid anställningar och ansökningar om forskningsmedel kunde deltagande i instrumentutvecklingsprojekt ges en mer framskjutande plats än vad fallet är idag.

vi, Inom astronomin ser man i viss mån en vikande trend när det gäller Sveriges bidrag till instrumentutveckling – att stärka denna del är angeläget, eftersom instrumentbyggande ger tillgång till mer observationstid med nya instrument.

vii, Flera delområden efterfrågar medel för inresande postdoktorer. En ökning av antalet inresande postdoktorer är av vikt för att ge svenska forskningsmiljöer en ökad internationell synlighet, och det skapar även förutsättningar för utvidgade internationella nätverk.

viii, Det framhålls som en brist från flera av fysikens delområden att experimentell verksamhet med ultrakalla atomer, Bose-Einstein kondensat etcetera saknas i Sverige och man ser ett problem i att den inhemska teoretiska verksamheten i detta så internationellt framstående delfält har en så pass blygsam omfattning i landet.

ix, Verksamheten vid NORDITA har en bred upplutning från fysik och astronomiämnena och en långsiktig finansiering är mycket angelägen. Mittag-Leffler-institutet bör ges ett liknande stöd – här finns intressanta beröringspunkter med den matematiska fysiken.

x, Vissa delar av svensk forskning i plasmafysik riskerar att bli underkritisk och kan behöva stärkas. Ett problem är att den inte har någon naturlig hemvist vare sig på grundutbildningsnivå på universiteten eller inom Vetenskapsrådets beredningsgruppstruktur.

xi, Universitetens prioritering av finansiering av dyrbar utrustning fungerar ännu inte tillfredsställande. När det gäller finansiering av utrustning och tillhörande projekt kunde även samspelet mellan rådet för forskningens infrastruktur (RFI), övriga delar av vetenskapsrådet och andra finansiärer förbättras.

## Astronomi och astrofysik

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Svensk astronomisk forskning<sup>1</sup> har en lång tradition, men har ständigt hittat nya riktningar och på så sätt hållit mycket hög kvalitet ur ett internationellt perspektiv. En rad internationella utvärderingar, bland annat av

---

<sup>1</sup> I denna text används orden astronomi och astrofysik synonymt

Uppsala universitet (2011), Lunds universitet (2007/2008) och Vetenskapsrådets utvärdering av Onsala Rymdobservatorium (2009) har visat att astronomisk forskning i Sverige har en väldigt hög standard. Den senaste nationella utvärderingen av astronomi ägde dock rum för 14 år sedan.

Eftersom astronomi täcker all utomjordisk fysik är det ett brett ämne. Solen, solsystemet, stjärnor, planeter (exoplaneter), interstellär och intergalaktisk materia, galaxer, galaxgrupper, deras strukturer och hur de bildas och utvecklas samt kosmologi behandlas inom ämnet. Ett litet land som Sverige har tyvärr inte resurser att engagera sig lika starkt i alla delområden, men de olika forskargrupperna kompletterar varandra väl, så att en stor del av de mest betydande områdena är representerade. Samverkan mellan teori, modellering och observationer är nödvändig, och samma personer är ofta involverade i flera av dessa aktiviteter. I Sverige finns en hälsosam sådan samverkan.

Den vetenskapliga utvecklingen inom ämnet är till stor del beroende av ny teknik för exempelvis nya teleskop och satelliter samt allt kraftfullare datorer. Astronomer var till exempel bland de första att använda CCD-detektorer för avbildning. Detta möjliggjorde upptäckten av avlägsna supernovor, vilket i sin tur ledde till upptäckten av den mörka energin, som idag anses vara ett av fysikens viktigaste olösta problem. De spektakulära upptäckterna av nya exoplaneter är ett resultat av allt noggrannare spektroskopiska och fotometriska metoder. Med Hubble-teleskopet och ESO:s Very Large Telescope (VLT) har galaxer som tros ligga så lång bort att deras ljus utsändes så tidigt som bara 400 miljoner år efter Big Bang upptäckts. Andra exempel där ny teknik leder till nya upptäckter är SST (Swedish Solar Telescope) och den nya markbaserade kortvågiga radiointerferometern ALMA. Den sistnämnda togs i bruk 2012, och redan nu har avlägsna galaxer och kometer kring andra stjärnor än solen detekterats och ett helt nytt fält av molekylär spektroskopi i terahertzområdet har utvecklats. Extrema händelser och objekt som gammastrålningsutbrott och pulsarer undersöks med satellitburna FERMI-LAT och det markbundna HESS teleskopet. Sådana objekt kan även studeras med röntgenstrålnings-polarimetri där det ballongburna PoGOLite ses som ett pilotexperiment för ett framtida satellitburet instrument.

Astronomin är extremt beroende av tillgång till den mest avancerade infrastrukturen, vilket i sin tur förutsätter internationellt samarbete. Medlemskapen i både ESO och ESA är livsviktiga för svensk astronomi. Utvecklingen av ny teknik och nya teleskop är ingalunda till ända, utan tvärtom kommer ett antal nya teleskop att tas i drift inom kort, eller är i planeringsstadiet. Den astrometriska satelliten GAIA har nyligen börjat kartlägga en stor del av Vintergatan, medan Hubble-teleskopets efterföljare, James Webb Space Telescope (JWST), planeras till 2019. ESO:s nästa stora projekt är European Extremely Large Telescope (E-ELT) som förhoppningsvis kommer att stå klart omkring år 2023. Andra vetenskapligt banbrytande och teknologiskt utmanande projekt med stort svenskt engagemang är radioteleskopet Square Kilometer Array (SKA), gammastrålningsteleskopet Cherenkov Telescope Array (CTA) och det europeiska solteleskopet (EST). ESA planerar bland annat två exoplanetprojekt, Cheops och Plato, och ett stort kartläggningsteleskop, Euclid. Anledningen till att så många olika typer av teleskop och satelliter behövs är främst att olika objekt sänder ut elektromagnetisk strålning av olika våglängder och därför krävs olika typer av detektorer. Gemensamt för de flesta av dessa instrument är att de riktar sig mot fundamentala frågor inom astrofysiken, som till exempel existensen av jordliknande planeter, egenskaper hos interstellär och intergalaktisk materia, bildandet av svarta hål, galaxernas och stjärnornas bildande samt mysteriet med den mörka materian och den mörka energin.

När det gäller karriärmöjligheter så är erfarenheter av stora internationella samarbeten en stor fördel. Att vara inblandad i framstående internationella projekt och att arbeta med forskning som har stark anknytning till nya teleskop- eller satellitprojekt skapar ofta goda möjligheterna till en framtida akademisk karriär. Det finns naturligtvis inte akademiska tjänster till alla som disputerar i ämnet i Sverige men för den som söker sig utomlands eller helt byter område så är en forskarutbildning i astronomi en bra grund. Disputerade i astronomi återfinns även inom finanssektorn, är verksamma inom medicinsk forskning (bildbehandling) eller sysslar med programmering.

## Styrkor och svagheter

Starka områden finns dels inom radioastronomin och inom andra traditionellt starka svenska områden såsom Vintergatsforskning och sol- och stjärnfysik, dels inom nya områden som exoplanetforskning,

högenergiastrofysik och kosmologi. Beräkningsastronomi, som tillämpas inom olika områden, har under de senaste åren också blivit en tydlig styrka i svensk astronomi. Vissa grupper kombinerar framgångsrikt observationer, teori och simuleringar inom till exempel stjärnatmosfärsforskning, molekylastronomi och forskning om supernovor. Mer renodlade observationella eller teoretiska verksamheter är också mycket framgångsrika, som exempelvis den svenska verksamheten inom GAIA-projektet, galaxforskning och magneto-hydrodynamiska simuleringar av stjärnatmosfärer. Det ska också nämnas att svenska projekt i hård internationell konkurrens lyckas få mycket god tillgång till observationstid på Hubble-teleskopet.

När det gäller instrumentutvecklingen så finns det både styrkor och svagheter. Det finns starka traditioner inom radioområdet, med instrument till bland annat ALMA och SKA, samt inom solforskningen (SST). Situationen inom optisk nattastronomi och rymdteleskop skulle klart kunna förbättras. Både inom ESO och ESA byggs de flesta hjälpinstrumenten (till exempel kameror och spektrografer) av konsortier av olika europeiska grupper. På rymdteleskopområdet har svenska grupper inom astronomi varit involverade i ett antal projekt, i allmänhet dock som en mindre partner. Sverige har dock medverkat i mycket få utvecklingsprojekt kring ESO:s teleskop. Till exempel gäller detta instrumenteringen till E-ELT. Deltagande i instrumentbyggande är viktigt. Dels ger det svenska grupper garanterade observationstid och svensk industri får möjlighet att ta hem värdefulla kontrakt som bidrar till att utveckla svensk spetskompetens. En koordinering av instrumentbyggandet inom astronomi i Sverige (och eventuellt också i Norden) borde övervägas.

Ett område som internationellt är mycket framstående men saknas i Sverige är storskalig galaxforskning. Genom att studera väldigt stora antal galaxer i ”surveys” förbättras inte bara vår förståelse av galaxernas egenskaper och utveckling, utan kan också användas inom kosmologi för studier av mörk materia och mörk energi. ESA:s satellitprojekt Euclid har detta som mål och engagerar närmare 1000 Europeiska astronomer men ingen från Sverige. Svenska astronomer är däremot framgångsrikt involverade i flera mindre, mer fokuserade, galaxforskningsprojekt.

En viss svaghet i svensk astronomi jämfört med andra länder är att antalet inkommande postdoktorer är relativt blygsamt. Inom internationell astronomi finns det generellt sett ett mer omfattande utbyte av forskare på postdoktornivå: nyblivna doktorer söker tjänster utomlands och utländska forskare kommer in. På detta sätt skapas det ständigt nya internationella kontakter och nätverk. För att kunna delta i utbytet är det inte bara viktigt att det finns postdoktjänster till svenska forskare utan också att svenska universitet kan vara värdar för utländska forskare. Det senare är i huvudsak alltför ovanligt i Sverige. Risken är att man som land då inte blir så synligt i det internationella forskningssamhället och därför går miste om viktiga internationella kontakter och nätverk.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Ett nytt område som har etablerats på flera ställen i landet är exoplanetforskning. Detta gäller även radioastronomisk forskning. Man kan se en ökande växelverkan mellan astronomi och partikelfysik, liksom mellan astronomi och ämnena atom- och molekylfysik, kemi, geologi och biologi. Detta har gett upphov till två nya områden astropartikelfysik och astrobiologi. Ett lyckat exempel är Oskar Klein Centret i Stockholm, där partikelfysik, astrofysik och kosmologi möts. Liknande närmanden har också skett på andra håll i landet. Även mellan biologer, fysiker, kemister, geologer och astronomer har flera samarbeten uppkommit inom astrobiologin.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Astronomi är ett ämne som fascinerar många. Att studera vår plats i universum och att ta reda på vår egen jords och även hela universums ursprung, tilltalar många. Astronomi har en viktig roll genom att barns och ungas intresse för vetenskap ofta väcks av frågor om ”rymden”. Det är också ett ämne som får uppmärksamhet i media, vilket gynnar hela naturvetenskapen.

Astronomi är ett ämne med en lång tradition i Sverige och är väl integrerat i det svenska akademiska systemet. Det har också i allmänhet goda band till fysiken (atom-, molekyl-, plasma-, kärn- och partikelfysik).

Internationellt sett är Sverige ett av de mindre länderna resursmässigt, men har ändå varit med och grundat både ESO och ESA.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Astronomin inklusive astropartikelfysiken är, liksom partikelfysiken, extremt beroende av förstklassig infrastruktur. ESO och ESA spelar här en central roll. Från att i början av 1990-talet ha varit ett ganska medelmåttigt observatorium har ESO genom VLT blivit världsledande trots att teleskopet inte tillhör de allra största men på grund av unika, extremt kraftfulla, hjälpinstrument. Till detta kommer solteleskopet SST och radioteleskopet ALMA, som togs i bruk 2012. Detta ger Sverige utmärkta möjligheter till högklassig forskning. Också genom ESA har Sverige tillgång till de mest intressanta rymdbaserade teleskoperna. Här kan nämnas Hubble-teleskopet och GAIA som sändes upp i slutet av 2013. Hubbles efterföljare JWST kommer att sändas upp 2019 och exoplanetsatelliten Plato år 2023. Även här finns ett omfattande svenskt engagemang.

Det finns också flera stora markbaserade projekt på gång. Sverige har redan beslutat att delta i ESO:s E-ELT, (2023). Andra projekt där det finns brett intresse i Sverige är det långvägiga radioteleskopet SKA, med planerad byggstart 2017. Onsala Rymdobservatorium har här en ledande roll i planeringen och designen. En uppföljare till gammastrålningsteleskopet HESS i Namibia – CTA – är under uppbyggnad med svenskt deltagande. För solfysiken finns planer på ett europeiskt solteleskop, EST, där svenska forskare är engagerade.

Slutligen ska också betonas att astronomi är mycket beroende av datorkraft. Dels gäller detta simuleringar av olika typer av fenomen, till exempel supernovaexplosioner, dynamiken hos stjärnatmosfärer eller galaxer, där tillgång till största möjliga datorkraft är avgörande. Svenska grupper utnyttjar superdatorresurser på SNIC och europeiska PRACE för sina simuleringar. Liknande resurser börja bli nödvändiga för bearbetning av observationella data, där till exempel SKA förutsätter en datorkapacitet som man inte kommer att uppnå förrän omkring 2020 enligt Moores lag.

Även om det kanske inte räknas som infrastruktur i ordets snävaste mening, är Nordita en mycket viktig resurs för svensk astrofysik. Speciellt intressant är den programverksamhet som initierats under senare år och som varit mycket framgångsrik, inte minst inom astrofysik och kosmologi.

## Astropartikelfysik, kärnfysik och partikelfysik

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Hur utvecklades universum från det att en del av energin materialiserades till de fundamentala byggstenarna under slutfasen av Big Bang, till vår värld som den ser ut idag med sin uppsättning grundämnen och bildandet av livets komplexa molekyler? Kunskapsutvecklingen i fältet sker till en väsentlig del på mikroskopisk (subatomär) nivå med experiment och teoribildning, där **Partikelfysiken** adresserar frågorna kring de minsta byggstenarna och krafterna mellan dem, **Kärnfysiken** hur dessa byggstenar sätts samman till hadroner och atomkärnor och hur energi, lagrad som massa, senare kan frigöras i fusionsprocesser i vår sol.

**Astropartikelfysiken** studerar frågor i gränsområdet mellan astrofysik och partikelfysik genom att observera högenergetisk strålning från universum. Den subatomära nivån hjälper oss att tolka Universum och observationer av Universum leder ofta till frågor på den subatomära nivån.

I stort sett all svensk forskning i detta fält ligger i den internationella frontlinjen och utförs med världsledande instrument som svenska forskare varit med att utveckla. Många av de resultat som nämns nedan har fått ett enormt genomslag på senare år. Flera för fältet viktiga stora instrument har tagits i fullt bruk under de senaste åren, som Large Hadron Collider (LHC) på CERN med sina olika experiment liksom neutrinoobservatoriet IceCube på Antarktis.

### Astropartikelfysik

I astropartikelfysik studerar man högenergetisk strålning från universum. IceCube-kollaborationens upptäckt av mycket högenergetiska kosmiska neutriner har rönt stor internationell uppmärksamhet. Satellitburna PAMELA

har rapporterat en oväntad ökning av högenergetiska positroner (antimateria) som skulle kunna tolkas som ett tecken på annihilation av mörk materia. Extremt högenergetisk gammastrålning studeras med det satellitburna FERMI-LAT och det markbaserade HESS teleskopet som därmed har kapacitet att indirekt observera mörk materia via dess sönderfall eller annihilation..

Svensk forskning i teoretisk och observationell astropartikelfysik är mycket stark på en internationell skala och är koncentrerat till några mycket starka grupper.

### Partikelfysik

LHC togs i bruk 2009 med stor framgång, tekniskt vad avser accelerator och experiment samt i fysikernas analyser av data. ATLAS-experimentet är specialiserat på proton-proton kollisioner vid högenergifronten. Det mest uppmärksammade resultatet hittills är upptäckten av Higgspartikeln med massa  $125 \text{ GeV}/c^2$ . Så långt har alla egenskaper hos Higgspartikeln överensstämmt med standardmodellen liksom ett stort antal andra resultat. I ALICE-experimentet vid LHC studeras kvark-gluon plasma, med oerhörda tätheter och temperaturer (hundra tusen gånger hetare än solen) liknande de som rådde under de första mikrosekunderna av Big Bang. Vid LHC skapas detta med kollisioner mellan blykärnor och det har överraskande visats att detta nya materietillstånd uppför sig som en vätska av starkt växelverkande kvarkar och gluoner. Framgången vid LHC är i hög grad också en succé för partikelfenomenologin med hjälp av vilken den förväntade fysiken modelleras. Partikelfenomenologi är ett styrkeområde i Sverige. Teori bortom standardmodellen har varit mindre företrädd men är under viss tillväxt i landet. Sverige har även framstående teoretisk forskning kring neutriner.

### Kärnfysik

Kärnfysiken i Sverige arbetar sedan några år mot den nya internationella FAIR anläggningen i Tyskland. Viktigt svenskt deltagande finns i forskning med radioaktiva strålar inom NUSTAR-samarbetet där svenska grupper bidrar med viktiga detektorsystem. I avvaktan på att FAIR ska stå färdigt (tidigast 2018), används dagens strålar på GSI och GANIL samt vid ISOLDE. Uppmärksammade resultat med svenskt deltagande har varit skapandet av grundämne 115 vid GSI och pärenformade kärnor vid ISOLDE. Hadronfysikexperimentet PANDA vid lagringsringen för antiprotoner vid FAIR är under uppbyggnad där den starka växelverkan vid låg energi studeras. Kvarkarnas inneslutning i protoner, neutroner och hadroner och hur dessa byggs upp av kvarkar vars massa bara motsvarar några procent av den sammansatta partikeln massa utgör en viktig del av PANDA's forskningsprogram som även innefattar precisionsmätningar på hadroner med charmkvarkar. Svenska grupper som siktar mot PANDA deltar i BESIII i Kina där observationer av fyrkvarktillstånd inkluderande charmkvarkar uppmärksammats speciellt. På teorisidan finns flera grupper för kärnteori som ofta är involverade i större internationella samarbeten. Teoriverksamheten i hadronfysik är framgångsrik.

### Styrkor och svagheter

Sverige bidrar i högsta grad till den internationella acceleratorinfrastrukturen genom sina medlemskap i CERN och FAIR. De svenska experimentgruppernas forskning är fokuserad på att utveckla instrumenteringen och att sedan bedriva forskning med instrumenten. Genom avancerat utvecklingsarbete får sådana insatser ett stort vetenskapligt mervärde. Den svenska astropartikelfysiken ligger även den i forskningsfronten vad avser instrumentering. De svenska grupperna utgör med dessa insatser ett viktigt svenskt bidrag till det globala forskningssamhället. Därigenom kan man förlägga forskningen där den för tillfället har bäst förutsättningar. En konsekvens är att alla de aktiviteter som nämnts i föregående kapitel är frontlinjeforskning i sin bransch och de instrument som det satts en svensk flagga på är världsledande. Den grundforskning som beskrivs här relaterar direkt till fysikutbildningens fundamentala frågeställningar. Att forskningen är universitetsbaserad ger en naturlig kontaktyta till utbildning och samhälle. Doktorander och masterstudenter utgör en viktig del av den personella forskningsresursen och de får genom projekten värdefull internationell erfarenhet. Vart och ett av de svenska stora universiteten har en bred miljö med teori och experiment för de olika profileringarna inom ämnesområdet.

En svaghet med universitetsmiljön är att det är svårt att upprätthålla den tekniska expertis och de tekniska faciliteter som är nödvändiga för verksamheten. Likaså är långsiktig drift av infrastrukturen och instrumenteringen utomlands främmande för universitetsmiljön. Här förlitar forskningen sig på de nationella finansierarna där grundforskning av denna typ huvudsakligen ligger inom Vetenskapsrådets område.

Med tanke på att alla verksamheter i fältet är mitt uppe i de största satsningarna på mycket länge har de personella resurserna inte växt på ett önskvärt sätt. Intresset från den yngre generationen är stort med många sökande till utlysta doktorandtjänster. Globalt är karriärmöjligheterna goda. En stor andel av nytexaminerade doktorer får postdoktorstjänster internationellt. Mekanismerna för att rekrytera på senior nivå, vilket ofta sker med en blandning av finansiering från externa källor och universiteten är svåröversäglbara vilket återspeglar sig i den långsiktiga utvecklingen. Rekrytering via strategiskt syftande externa medel, exempelvis genom Vetenskapsrådets rådsforskartjänster, är inte längre möjlig vilket är en klar nackdel för denna typ av mycket långsiktig verksamhet.

Svårigheten på personalsidan gäller både teori och experiment. Universitetstjänster som fordrar externmedel till lön har dålig konkurrenskraft internationellt. Ständigt krympande fakultetsmedel för löner och doktorander gör inte saken bättre. Ett gemensamt krafttag kring forskarlöner, doktorand- och postdoktorsfinansiering från universitet och forskningsråd skulle vara välkommet.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Den svenska forskningen i fältet sker i den internationella frontlinjen med nystartade (eller snart startande) långsiktiga utvecklingslinjer inom respektive forskningsriktning. En trend är att antalet universitet som deltar i dessa internationella grundforskningsprojekt växer stadigt, där stora satsningar från Asien och Sydamerika är speciellt värda att notera.

Astropartikelfysiken, inklusive experiment vars syfte är direkt detektion av mörk materia har god tillväxtpotential. Bland de pågående aktiviteterna sker en utbyggnad av HESS till Cherenkov Telescope Array, CTA, som använder jordatmosfären som detektormedium och där Sverige deltar aktivt i utvecklingsarbetet. IceCube planerar en högenergiuppgradering som främst syftar till att upptäcka källorna för de kosmiska neutriner samt en lågenergiutbyggnad, PINGU för ökad precision i studier av fundamentala frågor kring neutriners masshierarki. Svenska forskare har även intressen i experiment som utvecklas för sökandet efter extremt högenergetiska neutriner.

Fokus när LHC-experimenten återupptas vid högre energi 2015 är att söka efter fysik bortom standardmodellen, mörk materia, obalansen mellan materia och antimateria och tunga kvarkar som testpartiklar på kvark-gluon plasmat. Ökad energi och intensitet i strålarna ger högre känslighet för ny fysik tillsammans med förbättrad selektivitet i experimenten. För ATLAS och ALICE har uppgraderingsarbetet påbörjats och beräknas vara färdigt 2023 respektive 2019. Det är i samband med fortsättningen vid LHC viktigt att befästa landets starka positioner inom QCD fenomenologi och en utbyggnad av teoriforskningen mot fysik bortom standardmodellen. Detta kunde också knyta an till strängteorin som är väl företrädd i landet.

Ny fysik, upptäckt vid hadronkolliderare, följs av precisionsstudier vid elektron-positron kolliderare. Två strategiskt förankrade projekt har omfattande utvecklingsprogram, CLIC på CERN och ILC, International Linear Collider i Japan. Svenskt deltagande sker på acceleratorsidan för CLIC och på detektorsidan för CLIC och ILC genom EU's ramprogram FP6-7.

NUSTAR och PANDA vid FAIR är huvudspåren för svensk kärnfysik. Acceleratorer och lagringsringar vid FAIR erbjuder inom en femårsperiod världens mest konkurrenskraftiga strålar för hadronfysik och för kärnfysik långt från stabilitetslinjen. REX-ISOLDE på CERN ger tillgång till mer kortlivade radioaktiva kärnor och kompletterar bilden för kärnfysikens del. Experimentmöjligheterna i hadronfysik följs upp med utveckling av effektiva fältteorier.

ESS som blir världens starkaste strålkälla för neutroner har sin huvudmotivering i materialfysik med tillämpningar. Som biprodukt får man också en mycket intensiv neutrinkälla. Förstudier till ett neutrino experiment, ESSnuSB, för att studera CP-brott medelst neutrino-oscillationer har påbörjats. Ett annat förslag syftar till att studera baryontalsbrott med så kallade neutron-antineutron oscillationer. Sådana specialiserade projekt förutsätter massivt internationellt deltagande.

Forskningen inom kärn-, partikel- och astropartikelfysik har under det senaste decenniet gjort stora framsteg som knyter mikrokosmos samman med makrokosmos. Fysiken bortom standardmodellen får en allt viktigare roll och därför kommer man i framtiden att behöva - förutom fortsatta långsiktiga satsningar på stora, övergripande experiment - utrymme för dedicerade experiment för t.ex. direkt detektion av mörk materia. Genom att högenergifronten nu höjts närmar sig experimenten ett område där strängteori kan vara betydelsefull.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Svensk forskning i ämnesområdet sker väl positionerad i den internationella frontlinjen. Ämnet är företrätt på de stora universiteten i Sverige liksom i världen. Svenska fysiker har över tid haft roller på högsta ledningsnivå i alla de stora samarbetena. Man samarbetar där direkt med fysiker från huvuddelen av världens "topp-100 universitet". Kärnfysiken griper in på många ställen i ett avancerat samhälle som vårt och utveckling av kunskap är här en nödvändighet.

Partikelfysikerna optimerar svenskt utnyttjande av LHC i ett konsortium, LHC-K. Kärnfysikerna samlas kring utnyttjandet av strålarna vid FAIR och astropartikelfysiken har projekt med flera svenska universitet. Samarbetet inom landet är utmärkt. Det är också till fördel att Sverige, med tillräckligt stora grupper, har tentakler ut i många forskningsfronter.

## Särskilda behov av infrastruktur

Infrastrukturen som behövs i detta fält är alltför storskalig för att vara nationell. Tillträde till konkurrenskraftig infrastruktur nås bland annat genom utvecklingsinsatser och bidrag till instrumenteringen. Detta ger flexibilitet och valet av infrastruktur drivs av de aktuella forskningsfrågorna. Det saknas säkerställd tillgång till teknisk expertis och tekniska faciliteter av olika slag. Driften av instrumenten, som oftast är ett året-runt-åtagande, är svår att kombinera med universitetstjänster med åtaganden i undervisning mm. Externa medel är därför en nödvändighet för att på plats, delta i forskning och drift. Driftsmedel som även inkluderar löne-medel skulle kunna vara en möjlig lösning för internationell infrastruktur.

Genomgående för alla fältets forskningsinriktningar är ständigt ökande behov av datorkraft. Gridteknologin framtagen för partikelfysik har använts framgångsrikt för analys av data från LHC men kräver ökat stöd ifall teknologin även skall gå att använda för dataanalys från andra experiment. E-science infrastruktur måste kontinuerligt bytas ut på grund av den tekniska utvecklingen. Drift och underhåll av hårdvaran sköts av SNIC, men det finns ett behov av att stärka och säkra underhållet av den mer användarnära generella mjukvaran.

## Atomfysik och molekylfysik

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Atomfysiken lade grunden för kvantfysiken. I molekyler studeras atomära bindningar och med hjälp av kluster kan vi studera den gradvisa övergången från beteenden hos enskilda isolerade kvantsystem till makroskopiska egenskaper hos kondenserad materia. Alltmer förfinade mätmetoder har lett till mer utmanande tester av kvantelektrodynamiken och till upptäckten av Bose-Einstein kondensation. Många mättekniker som utvecklats inom fältet har kommit till bred användning inom ett flertal tekniska, naturvetenskapliga och medicinska discipliner. Exempel är NMR, så kallade pump-prob tekniker, fjärranalys av luftföroreningar och massspektrometri. De experimentella och teoretiska verksamheterna samspelar nära, vilket är avgörande för att föra kunskapen framåt. Den teoretiska forskningen spänner från studier av tvåkropparsproblemet i väteliknande atomära system, via enklare molekylära kvantsystem till stora kluster där statistiska metoder används.

Atomer, molekyler och kluster studeras med hjälp av lasrar med pulslängder från nanosekunder ned till attosekunder. Med synktroner genereras ljus av varierbar våglängd, och deras vidareutveckling till frielektronlasrar ger extremt hög intensitet vilket ger förutsättningar för diffraktionsavbildningar av enstaka biomolekyler. Utvecklingen av atomur med hjälp av stabiliserade lasrar har lett till de mest noggranna mätningarna som mänskligheten utfört med en precision av en del av  $10^{18}$ . Man studerar egenskaper hos



atomära system vid mycket låga temperaturer och vid extremt höga elektriska fältstyrkor. Med jonfällor, atomfällor och lagringsringar kan enskilda isolerade kvantsystem studeras på extremt långa tidsskalor. Detta ger till exempel möjligheter att kontrollera och manipulera kvanttillstånd. Kollisionsprocesser studeras med förfinade metoder där full kontroll över både reaktanter och reaktionsprodukter eftersträvas. Detta anknyter till ett viktigt fält, laboratorieastrofysiken, där målet är att använda laboratorieresultat som stöd för tolkningar av astronomiska observationer. Internationellt sett har kvantoptiken växt mycket starkt under senare år och rönt mycket intresse bland annat genom sin nära koppling till kvantinformatiken. Studier av exotiska atomer som till exempel antiväte är även det ett hett forskningsområde.

## Styrkor och svagheter

Forskningen i atom och molekylfysik utförs idag vid många svenska universitet och står sig i stora delar mycket väl i en skarp internationell konkurrens. Exempel här är atomspektroskopi på attosekundstidsskalan där man undersöker dynamiken i atomers elektroniska övergångar eller accelererar laddade partiklar till höga energier med ”table-top” utrustning. Här bär svenska forskare delvis fältet framåt internationellt.

Grundläggande atom-, molekyl- och klusterfysik studeras framgångsrikt av flera svenska grupper vid t.ex. synkrotronljusanläggningar såsom MAX-lab och ofta använder man sig då av innerskalsvakanser med tillhörande relaxationsdynamik för att t.ex. undersöka olika atomers roll i molekylära bindningar och hur dessa påverkas av sin omgivning (i vätskor och kluster). Här finns traditionellt en mycket stark svensk ställning som nu även används för att etablera ledande roller i internationella samarbeten runt frielektronlaseranläggningar.

Experimentella studier av struktur och dynamik hos små kvantsystem bedrivs också med hjälp av andra, t.ex. acceleratorbaserade, metoder av flera mycket starka forskargrupper i landet. De innefattar undersökningar av atomer, molekyler, kluster och deras reaktioner. Dessa system studeras i form av negativt och positivt laddade joner och i det senare fallet högt laddade joner. I båda dessa fall har Sverige ledande ställningar internationellt. Vidare finns en stark tradition av optisk atom- och molekylspektroskopi, inte minst med astrofysikaliska tillämpningar och med industriella och miljömässiga applikationer. Aktiviteter inom området reaktionsdynamik kommer att växa i och med färdigställandet av lagringsringen DESIREE i Stockholm. Den världsunika konstruktionen och koppling till kollisionsprocesser i det interstellära mediet gör det till en verksamhet vid den absoluta forskningsfronten.

Den teoretiska forskningen i Sverige, vilken historiskt varit mycket framgångsrik, står fortfarande stark. Idag finns stark forskning rörande atomer och molekylers struktur och dynamik, ultra-kalla kollisioner och Bose-Einstein-kondensat. Ett problem, speciellt i det senare fallet är dock att dessa viktiga teoretiska verksamheter har en liten omfattning och bärs upp av få forskare. Exotiska atomer och antiväte studeras främst teoretiskt i Sverige och det finns en lång framgångsrik tradition att utveckla teoretiska metoder för allt mer precisa beskrivningar av QED-effekter. På senare år har en stark verksamhet inom kvantoptiken byggts upp – experimentell verksamhet finns än så länge på ganska få universitet medan teoretisk verksamhet finns på fler ställen.

I Sverige bedrivs för närvarande inga experimentella studier med ultrakalla atomer, trots att detta är ett centralt område internationellt.

I landet finns ledande forskare inom atom- och molekylfysik och Sverige förfogar över infrastruktur av världsklass. Svårigheten att finansiera doktorander och driften av såväl experimentella som teoretiska projekt för de enskilda forskarna/användarna gör dock att forskningspotentialen kanske ändå inte utnyttjas till fullo.

Karriärmöjligheterna för unga forskare inom ämnet är goda. De förhållandevis småskaliga experimenten och det faktum att väsentliga delar av den avancerade vetenskapliga utrustningen konstrueras i de egna laboratorierna gör att doktoranderna får en mycket allsidig träning. Inte sällan fortsätter de sina karriärer på storföretagens forsknings- och utvecklingsavdelningar, i nystartade innovationsföretag, vid myndigheter och inom akademien.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Det har under de senaste årtiondena skett en enorm utveckling av lasrar, synkrotronstrålare och frielektronlasrar. Nya energiområden, kortare pulser och högre intensiteter har öppnat nya forskningsområden. Utvecklingen av ljuskällorna har varit en pådrivande faktor för såväl experimentella som teoretiska studier. Här kan till exempel nämnas utvecklingen av korta laserpulser, som använts för att studera dynamiska förlopp först i molekyler på femtosekundstidsskalan och nu även i atomer på attosekundstidsskalan. Detta har i sin tur har drivit på utvecklingen av teoretiska modeller. Forskning vid synkrotronljuskällor har under flera decennier varit omfattande framför allt inom mjukröntgenområdet. Omfattande verksamhet inom atom-, och molekylfysik har skett vid MAX-Lab och svenska forskare är också mycket aktiva vid internationella anläggningar som SOLEIL (Paris) och BESSY (Berlin).

Övertongenerering (High Harmonic Generation, HHG), en effekt som upptäcktes när växelverkan mellan atomer och högentensivt laserljus studerades, har nu utvecklats till en konkurrenskraftig källa för ljus i UV- och mjukröntgenområdet för studier av multifotonjonisation och för XUV-XUV pump-prob experiment.

På många håll i världen byggs nu frielektronlasrar. Med dessa kan koherent strålning med hög fotonenergi och hög pulsenergi (många fotoner) skapas. Ljuset från dessa är unikt, och det kommer med all sannolikhet att leda till nya vetenskapliga genombrott. En begränsande faktor är dock att de är enanvändarfaciliteter. Detta gör att de inte kommer att få samma roll som synkrotronljus och lasrar som ett basverktyg för forskningen men kommer å andra sidan att vara oundgängliga för vissa typer av spetsexperiment.

Ett fält med stor utvecklingspotential är laboratorieastrofysiken. Det har alltid funnits en stark koppling mellan astronomiska observationer och spektroskopiska undersökningar i laboratoriemiljö. Genom att en rad nya mycket kraftfulla teleskop tagits i bruk har intresset för fältet ökat markant. Exempel på samspel mellan observationer och laboratorieundersökningar är upptäckten av negativa molekylära joner i det interstellära mediet och påvisandet av högt laddade joners roll för röntgenemissionen från kometer. I detta sammanhang bör verksamheten vid DESIREE uppmärksammas, i vilken växelverkan mellan positiva och negativa joner – eller mellan joner och fotoner - kan studeras under betingelser som efterliknar de i det interstellära mediet. Anläggningen har just tagits i bruk, och man kan förvänta sig en kraftigt ökad aktivitet under den kommande 5-årsperioden. Det finns ingen motsvarande anläggning i världen, och den kommer sannolikt att utnyttjas av många internationella användare.

Instrumentutvecklingen är således av avgörande betydelse för ämnet och inkluderar även VMI (Velocity Map Imaging), magnetiska flaskspektrometrar och reaktionsmikroskopi. Med dessa tekniker kan vinkel-, rörelsemängds- och energifördelning mätas samtidigt för elektroner och joner från olika typer av jonisations- och dissociationsprocesser.

Stora kollaborationer med svenskt deltagande vid CERN undersöker aktivt beteende i gravitationsfältet samt dess emissions- och absorptionsegenskaper. En annan typ av exotiska atomer är kvantprickar ("quantum dots") som teoretiskt beskrivs av modeller från atomfysiken.

Kvantoptiken är ett relativt nytt område som växt mycket starkt under senare. Här behandlas optiska fenomen på nivån av enskilda ljuskvanta och har stor betydelse för ämnet kvantinformatik och dess tillämpningar.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Svensk atom- och molekylfysik är internationellt mycket stark, med USA, Tyskland, Frankrike och Österrike som ledande nationer. Många forskningsfält och tillämpningar har startat genom vetenskapliga genombrott inom atom- och molekylfysikens områden. Här kan till exempel NMR, lasern och många analytiska metoder (t.ex. absorptionspektroskopi) nämnas. I dagsläget ser man hur utvecklingen av femto- och attosekundspektroskopi, till stora delar utvecklad av forskare inom atom- och molekylfysiken, nu får sin användning inom en rad olika forskningsfält, inom till exempel materialvetenskap, biologi och medicin.

Såväl i Sverige som internationellt utgör forskningsfältet en förhållandevis liten del av fysiken om man ser till antalet professorer vid akademiska institutioner. Verksamheten har tydligt begränsats av att forskningsfinansieringen under de senaste decennierna alltmer fokuserats på tillämpad forskning. Exempelen

ovan visar dock att atom- och molekylfysiken på ett avgörande sätt bidrar till den vetenskapliga och samhälleliga utvecklingen, men ofta med ett tidsperspektiv bortom de hos finansierare av tillämpad forskning.

Svensk forskning i atom- och molekylfysik har historiskt sett varit väldigt stark, och detta gäller än idag. Den stora avvikelserna i förhållande till de internationella trenderna är avsaknaden av experimentell forskning med ultrakalla gaser. Inom fälten synkrotronljusforskning, studier av korta pulser och atomär kollisionfysik intar forskare från Sverige internationellt ledande roller.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

En snabb utveckling på instrumentsidan är en bidragande faktor till den goda utvecklingen inom atom- och molekylfysiken såväl i Sverige som internationellt. Den viktigaste och mest använda infrastrukturenheten inom atom- och molekylfysik i Sverige är MAX-lab i Lund, som redan idag utgör basen för många världsledande forskare i fältet. De nya diffraktionsbegränsade synkrotronljusringarna vid MAX IV kommer att ersätta dagens anläggning 2016. Det finns en stor potential och ett behov av att utveckla svensk forskning i atom-, molekyl- och klusterfysik vid MAX IV och denna kan tillvaratas genom att placera experimentstationer vid redan beslutade strålrör eller genom att utveckla egna strålrör för denna typ av fysik.

Den andra nationella infrastrukturen för forskning inom atom- och molekylfysik i Sverige är den elektrostatiske dubbla jonlagringsringen DESIREE i Stockholm. Denna bygger på en helt ny teknologi som till exempel ger forskare möjlighet att studera lågenergetiska kollisioner mellan negativa och positiva joner vid mycket låga temperaturer (10 K). Efter ett långt utvecklingsarbete har nu denna världsunika anläggning tagits i bruk. De första studierna av livslängder för metastabila kvanttillstånd har genomförts under 2014.

Vid Lasercentrum i Lund, som är en nod av Laser-lab Europe - finns infrastrukturer för produktion av korta laserpulser, korta våglängder och extrema intensiteter.

Ett flertal frielektronlaser har tagits i bruk under senare år, och svenska forskare har genomfört experiment vid LCLS vid Stanford, SCSS och SACLA i Japan och FERMI i Italien. Vidare bidrar Sverige genom "in kind" bidrag till utvecklingen av "European XFEL". MAX IV är konstruerad för att inkludera en FEL och denna fråga drivs av SFEL ("the Swedish FEL –consortium"). Det förs även diskussioner kring en THz FEL i Sverige.

Vid antiprotondeceleratorn vid FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) och dess SPARC (Stored Particles Atomic Physics Research Collaboration) deltar svenska forskare i forskning rörande relativistiska effekter, precisionsmassmätningar och QED-effekter i högt laddade joner.

## Fusions-, rymd- och plasmafysik

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Fusions-, rymd- och plasmafysik är ämnen där materiens fjärde tillstånd, plasmatillståndet, utgör grunden. I ett klassiskt plasma är elektronerna dissocierade från atomkärnorna, ett tillstånd som är mycket vanligt i universum. Här på jorden hittar vi exempel i svetslågorna och lysrör, längre bort hittar vi jonosfären och solvinden och ännu längre bort finns interstellära medier och ackretionsskivor kring svarta hål, neutronstjärnor och nybildade stjärnor för att bara nämna några exempel. Tillgängligheten till fria laddningsbärare innebär att många nya fenomen och kollektiva egenskaper blir viktiga i plasmor.

### Fusionsfysik

Stora delar av den experimentella fusionsplasmafysiken är koncentrerade runt ett antal experimentella anläggningar med magnetiskt inneslutna plasmor. Dessa kan indelas efter magnetfältsgeometrin. Viktiga anläggningar ur ett svenskt perspektiv innefattar tokamak-anläggningar såsom det Europeiska experimentet JET vid Culham i Storbritannien, det internationella experimentet ITER som är under uppbyggnad i Cadarache i Frankrike. Vidare finns en anläggning av stellarator-typ i Greifswald i Tyskland och Extrap vid KTH i Stockholm, som är en anläggning av typen Reversed Field Pinch. Den svenska representationen vid de större

internationellt finansierade anläggningarna är förhållandevis god. Den teoretiska fusionsplasmafysiken har många beståndsdelar gemensamt med grundläggande teoretisk plasmafysik. Problemområden som exempelvis instabiliteter, turbulens, och upphettningsmekanismer har alla sin bas i den grundläggande plasmafysiken. Fusionsplasmafysiken kännetecknas av ett stort intresse för effekter av komplicerade magnetfältsgeometrier, och har ett naturligt fokus på parametrar relaterade till fusionsprestanda. Fusionsfysik innefattar även materialfysik och ingenjörsvetenskapliga frågeställningar. Exempelvis är utvecklingen av material som står emot det kraftiga neutronflödet i en fusionsreaktor ett viktigt område. Vissa forskningsområden inom fusion, som exempelvis "Plasma–Vägg-Växelverkan", har inslag av både plasmafysik och materialfysik. Beräkningsfysiken blir alltmer betydelsefull inom fusionsområdet. Beräkningar görs oftast med numeriska koder som tillåter ett fullt tredimensionellt rumsberoende. Fullt sjudimensionella koder baserade på kinetisk teori är för lång framtid realistiska, och den beräkningsmässiga metodutvecklingen sker därför i nära samspel med analytiskt arbete.

### Rymdfysik

Inom rymdfysiken utforskas planeters och de närmaste omgivningarna av asteroider, kometer, månar och ringar. Där finns neutral gas och stoft i form av atmosfärer och ringformade diskar, rymdplasma i jonosfärer och magnetosfärer, samt kopplingar dem emellan. Drivkrafter är oftast solaktiviteten och solatmosfären men också solvinden har betydelse. Även kosmisk strålning, vissa månars vulkanism och/eller magnetfältets rörelse genom planetrotation är av stort intresse inom fältet. Rymdfysiken utgör en stor del av nutidens planetsystemutforskning, och ger en detaljerad förklaringsgrund för många astronomiska objekt eller fenomen, som t.ex. exoplaneter, ackreationsdiskar och kosmisk strålning. Rymdfysikens resultat baseras nästan helt på tolkningar av observationer (direkt eller via jämförelse med fysikaliska modeller), där data från rymdfarkoster nu dominerar dataflödet, men där viss information fortfarande hämtas från radaranläggningar, ballong- och raketmätningar. Områdets teoretiska verksamheter har starka kopplingar till astrofysik och plasmafysik, då en stor del av rymdmiljöerna utgörs av plasmor och relaterad elektromagnetisk (elektrodynamisk) koppling. Skillnaden mellan astrofysik och rymdfysik är på väg att försvinna, även om rymdfysik baseras främst på in-situ mätningar i solsystemet. Inom rymdfysiken ägnas stor kraft åt att samla in bättre mätdata, liksom att säkra observationsdata från nya områden i rymden, vilket sker huvudsakligen genom nya rymdfarkostprojekt och tillhörande instrumentutveckling, ofta då i samarbete med European Space Agency (ESA), men även med andra internationella rymdagentur. Många rymdforskare ägnar sig till stor del, förutom instrument- och metodutveckling, åt analys av observationsdata och modellering av plasmaprocesser. Teoretiska och beräkningsinriktade grupper har visst överlapp med fusionsplasmafysiken och plasmafysiken, då de grundläggande fysikaliska beskrivningarna till en del är de samma. Detta gör att studier av t.ex. magnetisk omkoppling ("reconnection"), lokala spänningsfall (s.k. dubbelskikt) och stoft-plasma växelverkan är viktiga. Dessa tre grundläggande rymdplasmafenomen har studerats framgångsrikt både i plasmalaboratorier och teoretiskt med stöd av rymdfysikaliska observationer.

### Plasmafysik

Experimentell plasmafysik i Sverige, undantaget fusions- och rymdplasmafysiken som beskrivits ovan, görs inom delområdena komplexa plasmor och tillämpad plasmafysik. Komplexa plasmor kan innehålla partiklar av nano- eller mikrometerstorlek och man undersöker hur plasmabeteendet i stort förändras i närvaro av sådana partiklar. Radikalt annorlunda egenskaper, exempelvis uppkomsten av nya fasövergångar, tillkommer då. En stor del av den tillämpade plasmafysiken är inriktad mot olika metoder för ytbehandling, men även andra områden finns representerade, såsom laserproducerade plasma. Den grundläggande plasmafysiken har under lång tid haft fokus på ickelinjära fenomen, men har på senare år intresserat sig mycket för så kallade kvantplasmor och effekter i extremt starka elektromagnetiska fält. Inom den grundläggande plasmafysiken utvecklar man modeller för plasmabeteenden under olika betingelser och man arbetar även med att utvärdera och förbättra sådana modeller. Den grundläggande plasmafysiken har naturliga kopplingar till, till exempel, den kondenserade materiens teori och atom- och molekylfysik vilket avspeglas i nationella och internationella samarbetsprojekt med dessa discipliner.

## Styrkor och svagheter

I Sverige finns en stor styrka i att ha varit historiskt framstående inom områdena fusionsfysik, rymdfysik och plasmafysik. Sveriges forskare var tidigt världsledande inom ett flertal områden inom de ovanstående ämnena, och kunde därför positionera sig på ett mycket bra sätt. Idag är svenska forskare fortsatt internationellt ledande inom en rad relaterade forskningsområden. Exempelvis är svensk rymdfysikforskning generellt sett mycket stark, med en befäst internationell ställning, med ledande positioner inom stora ESA projekt (t.ex. JUICE). Den har också ett stort stöd (inte enbart ekonomiskt utan också organisatoriskt) som ligger utanför Vetenskapsrådets ramar, exempelvis via IRF (Institutet för Rymdfysik) och Rymdstyrelsen. Noteras kan att Rymdstyrelsen nästan uteslutande finansierar rymdfarkostbaserad instrumentering och viss relaterad forskning, varvid ytterligare behov av forskningsfinansiering idag hänvisas till antingen Vetenskapsrådet eller egna medel (inom IRF eller lärosäten). När det gäller ekonomiskt och organisatoriskt bidrag så har fusionsverksamheten stöd från Energimyndigheten och Euratom. En ytterligare styrka är väl utvecklade internationella kontaktnät för rymdfysik, fusionsplasmafysik och grundläggande plasmafysik. Forskare inom dessa fält samarbetar aktivt både inom stora internationella nätverk och i mindre, mer informella, samarbeten.

En viss svaghet finns i återväxten, med undantag för rymdfysiken där återväxten är förhållandevis god. Ett problem inom svensk (och internationell) forskning i de två andra fälten är rekryteringen av unga forskare. För internationella projekt som ITER och W7-X finns i vissa fall också svårigheter att rekrytera mer erfarna forskare. Därigenom finns en risk att de relativt få svenska forskarna som skulle ha möjlighet att arbeta inom ramen för det svenska akademiska systemet lockas att flytta utomlands. Återväxtproblematiken skapar också sekundära problem genom att ämnena kan komma under vad som kan uppfattas som en rimlig "kritisk massa". Om en svag rekrytering fortsätter löper ämnena risken att blir isolerade öar, från att ha varit relativt starkt kopplade till varandra. Här ser man också att det sammanbindande kittet, plasmafysiken, spelar en stor roll för att hålla dessa tre ämnen samman till en väl fungerande forskningsmiljö. Fusionsforskningen i Sverige är nationellt väl organiserad och deltagande grupper redovisar sina aktiviteter i ett gemensamt Europeiskt fusionsforskningsprogram (EUROfusion). Det finns en lite oroande trend inom vissa delar av plasmafysiken i det att de svenska forskningsresultaten över tid uppmärksammas allt mindre i relation till motsvarande internationella forskning. Detta kan till en del höra samman med krympande miljöer och vara relaterat till de problem med rekrytering som nämnts ovan. I stora delar är dock situationen gynnsam. Svensk plasmafysik inom bland annat rymdområdet röner ofta mycket stor uppmärksamhet internationellt.

Det finns alltså en viss svaghet på rekryteringssidan för svensk fusions- och plasmafysik. Hur ska tillräckligt många unga och kompetenta forskare inom dessa fält ges plats inom det svenska systemet? Kan dessa yngre forskare senare också absorberas in i det reguljära universitetssystemet som blir allt mer ansträngt bland annat genom krav på egen finansiering av dyrbar vetenskaplig utrustning.

## Trender, utvecklingsaspekter och utvecklingspotential

Inom observationell rymdfysik har man under de senaste 25 åren gradvis bytt fokus från studier av jordens norrskenprocesser till nya områden. Med hjälp av rymdfarkoster studerar man solkoronan, solvinden, rymdplasmaturbulens och magnetisk omkoppling ("reconnection") i magnetosfären. En annan trend går mot studier av rymdfysiken kring planetsystemets himlakroppar och dess roll för utvecklingen och förhållandena där. Svensktillverkade instrument finns just nu på eller är på väg till Merkurius, Venus, Mars, asteroider, kometer, Jupiter och Saturnus, samt dess ringar och månar. Planetsystemets utforskning sker idag till stor del via rymdfysiken, och tillämpningar av denna kunskap kommer i allt högre grad till godo för t.ex. utforskningen av exoplaneter och ackreationsdiskor. Det finns därför ett visst behov av att utöka områdets forskningspotential via nyrekrytering av yngre forskare, så att Sverige kan befästa sin internationella ställning inom rymdfysikområdet och fortsatt vara drivande inom internationell rymdforskning i stort.

Beräkningsfysiken ökar i betydelse inom fusions-, rymd- och plasmafysiken, och Sverige erbjuder genom Swedish National Infrastructure for Computing (SNIC) utmärkta och välutnyttjade möjligheter att utföra storskaliga plasmaberäkningar. Här kan man också hitta möjliga industrianknytningar eller tillämpningar inom närliggande forskningsområden, som den kondenserade materiens fysik eller atom- och molekylfysiken. I det senare fallet kan speciellt forskning inom laser-materiaväxelverkan nämnas, som t.ex. ytplasmonik och

laserdriven partikelacceleration. Fusionsfysiken behandlar ett utomordentligt viktigt problem med stor betydelse för vår framtida energiförsörjning. Möjligheterna till samarbeten med sol- och astrofysiken, atom- och molekylfysik, den kondenserade materiens fysik och astrofysiken mer generellt är många och intressanta för rymdfysiken och den grundläggande plasmafysiken. Beräkningssidan representerar en stark och autonom forskningsgren inom fusions- och plasmafysik, där stor potential för interdisciplinära samarbeten finns, men där en mindre gynnsam trend kan ses på finansieringssidan. I rymdfysik spelar modelleringar en allt större roll för att förstå växelverkan mellan en himlakroppas atmosfär och det omgivande rymdplasma, likaså spelar det en allt större roll att förstå turbulens- och gas-stoft-plasma processer. I rymdfysik görs dock modellberäkningar bara i begränsad omfattning inom landet. Istället utnyttjas internationella samarbeten för att täcka detta behov.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Fusions-, rymd- och plasmafysik är beroende av internationell forskningsinfrastruktur. Speciellt tydligt blir det för områdena fusionsfysik och rymdfysik, där två tydliga aktörer kan ses på den europeiska scenen: Euratom och ESA. ITER är av stor vikt för den svenska fusionsverksamheten i dess nuvarande form, precis som svenska fusionsforskare har och har haft stort utbyte av anläggningen vid JET. Här bidrar svenska forskare på ett förtjänstfullt sätt både på teori- och experimentsidan. För rymdfysik är samarbeten inom ESA, men även med andra rymdagenturer, viktiga. Exempel här är rymdfarkostprojekten Cluster, Mars Express, Venus Express, Cassini, Rosetta, MMS, och det Indiska månprojektet Chandrayan. Svensktillverkade instrument finns just nu eller är på väg till Merkurius, Venus, Mars, asteroider, kometer, Jupiter och Saturnus, samt dess ringar och månar. De forskningsresultat som svenska rymdfysikforskare presenterat har starkt bidragit till att öka vår förståelse av de fysikaliska processer som sker i jordens omgivning såväl som i övriga celesta kroppars omgivning (planeter, ringar, månar, kometer, asteroider) i vårt solsystem.

När det gäller plasmafysik så finns liknande behov av dyrbar utrustning som ovan, men möjligen i något mindre skala. Exempelvis kan experimentell verksamheten inom fältet komplexa plasmor vara mycket dyrbar och behöva kompletteras med satellitobservationer som även de är kostsamma. En minst lika viktig och inte försumbar infrastruktur tillhandahålls nationellt av SNIC. Här kan vi se ett ökat behov i framtiden, då beräkningsverktyg görs tillgängliga för en större grupp forskare och inom ett vidare område av fusions-, rymd- och plasmafysiken, som till exempel laser-materieväxelverkan (vilket annars normalt räknas till atom- och molekylfysiken).

## Kondenserade materiens fysik

Den kondenserade materiens fysik syftar till att utifrån grundläggande principer förklara och förutsäga fasta och flytande materials egenskaper och är det största forskningsområdet inom fysiken, en ställning som betingas såväl av dess omfattande rikedom på fenomen som av dess stora betydelse för tekniska tillämpningar.

## Beskrivning av forskningen inom ämnet

Kondenserad materia karakteriseras av växelverkningar mellan ett stort antal beståndsdelar som trots att deras uppförande var för sig följer enkla lagar kan leda till oväntade och komplexa materialegenskaper. Fältet har präglats av en ständig ström av upptäckter av nya ”emergenta” fenomen och materietillstånd. Inom kvantmekanikens område har dessa varit särskilt spektakulära med exempel som supraledning, suprafluiditet, magnetism och nya topologiska faser, ofta beskrivna med hjälp av exotiska ”kvasi”-partiklar. Vunna insikter upptas och används av andra forskningsområden. Resultat från studier av t.ex. mångpartikelsystem, kritiska fenomen, bruten symmetri och defekter har haft stor betydelse för kärnfysik, elementarpartikelfysik, astrofysik, atom- och molekylfysik samt för kemi.

Utmärkande är också att den kondenserade materiens fysik tillhandahåller den kvantmekaniska grunden för t.ex. mekanik, hydrodynamik, termodynamik, elektronik, optik, metallurgi och fasta tillståndets kemi. Samtidigt är den oumbärlig för högteknologisk utveckling och innovation. Viktiga genombrott som transistor, supraledande magneter, vissa typer av lasrar, bilkatalysatorer, magnetisk resonanstomografi (”NMR”) och

ytterst känsliga detektorer som möjliggör hur vi kommunicerar, utveckling av datorer och utveckling av hållbar energianvändning bygger i stor utsträckning på landvinningar inom den kondenserade materiens fysik.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Forskningen inom kondenserade materiens fysik producerar alltjämt en strid ström av resultat av betydelse för såväl fundamentalt ny begreppsbyggnad som samhällsviktiga tillämpningar. Detta gäller särskilt inom nano-, informations- och energifysiken samt magnetism (inklusive spintronik) och nya material (topologiska isolatorer, starkt korrelerade material, mjuka material, artificiella- och lågdimensionella material).

När det gäller tillämpningar står vi mitt uppe i en revolution där glödlampor och lysrör är på väg att ersättas av högeffektiva och långlivade ljuskällor, möjliggjorda av framsteg i tekniken för att framställa rena kristaller av halvledare med stort bandgap och kontrollerad dopning. För energiproduktion har solceller baserade på kiselkristaller redan fått ekonomisk betydelse även om den avgörande omställningen kommer att ske när billigare solceller kan massproduceras. Genombrott på den fronten kan snart förväntas när det gäller t.ex. organiska solceller och solceller baserade på perovskitmaterial. Ett annat viktigt tillämpningsområde är sensorer där man kan notera att de signaler som nyss registrerats av ett teleskop på sydpolen och som (eventuellt) beror på gravitationsvågor från universums inflationsfas uppfångats med hjälp av supraledande detektorer. På sensor- och detektionssidan finns en stor utvecklingspotential inte minst när det gäller tillämpningar inom det medicinska området.

Det senaste stora genombrottet inom kondenserade materiens fysik kom för mindre än tio år sedan genom upptäckten av topologiska isolatorer. Studiet av dessa är i dag det kanske mest aktiva området inom fältet, såväl vad gäller experiment som teori. Det stora intresset drivs inte minst av teoretiska förutsägelser om exotiska ytegenskaper med möjliga tillämpningar inom spintronik och kvantinformatik. Här finns en stor potential för att gå vidare genom att inkludera effekter av starka växelverknings där teoretiska framsteg redan gjorts internationellt men där vi i Sverige ligger efter. En intressant trend är att bl.a. dessa teoretiska förutsägelser testas i system av kalla atomer fångade i ett optiskt gitter, där det också finns utrymme för utökad såväl teoretisk som experimentell inhemsk forskning.

Andra genombrott från senare år som fortsätter att driva forskningen är t.ex. upptäckten av de så kallade pniktiderna 2008, en ny typ av högtemperatursuparledare som baseras på järn och arsenik snarare än koppar och syre. Möjligheten att framställa grafen och andra atomärt tunna material som bornitrid och molybdendisulfid kommer att ha fortsatt stor betydelse. Nya metoder för att extrahera information om strukturer mindre än halva ljusvåglängden får en allt större betydelse för den biologiska fysiken liksom för biologisk och medicinsk forskning.

På infrastruktursidan förväntas MAX IV och ESS öppna nya möjligheter för den experimentella kondenserade materiens fysik, men i det senare fallet är det en betydande utmaning att utbilda yngre forskare som effektivt kan använda anläggningen. Sverige har i dag en relativt blygsam verksamhet runt neutronspridning och spallationskällor, med relativt få forskare som i nuläget skulle kunna utnyttja t.ex. ESS.

## Styrkor och svagheter

Den senaste stora utvärderingen av forskningen inom kondenserade materiens fysik i Sverige gjordes av en internationell expertpanel år 2004 (Evaluation of the Swedish Condensed Matter Physics 2004, Vetenskapsrådets rapportserie 12:2005). Många av deras slutsatser är fortfarande relevanta. Det gäller inte minst deras kritik av den höga graden av externfinansieringen av seniora anställningar inklusive professorer vid universiteten, en kritik som framförts många gånger. Detta är en ovanlig förekomst i ett internationellt perspektiv och en uppenbar konkurrensnackdel. Situationen försvårar en långsiktig planering och tenderar att gynna ”säkra” projekt samtidigt som högriskprojekt är mycket sällsynta.

I sin rapport delade expertpanelen in den kondenserade materiens fysik i sju undergrupper, som även kan användas för att karakterisera dagens forskning i Sverige: ytfysik, mellanytefysik och tunna filmer; nanovetenskap och nanoteknologi; magnetism och spintronik; halvledare; supraledning; kondenserade materiens teori; mjuka material och biofysik. Man fann svensk forskning inom kondenserade materiens fysik

internationellt stark med många exempel på excellent och världsledande forskning, speciellt inom kondenserade materiens teori, nanovetenskap och ytfysik. All utvärderad forskning befanns vara värd finansiering. Många av de forskare som är aktiva i dag med stöd från Vetenskapsrådet utvärderades 2004 samtidigt som nya bidragsmottagare tillkommit. Flera av de yngre forskare som fick särskilt goda vitsord då har i dag egna framgångsrika forskningsgrupper vilket ger bilden av en positiv organisk utveckling av forskningsområdet under de tio år som förflutit.

En svaghet i Sverige, som togs upp av expertpanelen, gällde fältteoretisk verksamhet och mångkropparsteori, som år 2004 ansågs vara mindre vanlig och ha sämre stöd än i många andra länder i jämförelse med en mycket stark teoretisk forskning baserat på täthetsfunktionalteori. Det bör dock noteras att det redan då fanns verksamheter med intressanta kopplingar mellan kondenserade materiens fysik och allmän teoretisk fysik, till exempel inom fältteoretisk beskrivning av växelverkande mångpartikelsystem. Nordita flytt till Stockholm år 2007 har nu lett till en klar förstärkning av denna forskningsinriktning. Nordita fungerar mycket väl i sin nya omgivning och bör kunna inspirera till en ytterligare välbehövlig expansion av den teoretiska forskningen om t.ex. starkt korrelerade material, "Diracmaterial" och kalla atomsystem som modellsystem för studier av mångpartikeleffekter av olika slag. I det senare fallet finns det även utrymme och behov av mer experimentell forskning i Sverige.

Sverige och kondenserade materiens fysik har varit gynnad av möjligheten att söka medel till dyrbar utrustning från Vetenskapsrådet och Knut och Alice Wallenbergs Stiftelse. Denna situation har ändrats radikalt nu när regeringen beslutade att flytta ansvaret från Vetenskapsrådet till universiteten och då även Wallenbergstiftelsen nu ändrat sin policy i samma riktning. I nuvarande övergångsperiod har en del universitet haft betydande svårigheter att hitta effektiva former för hur medel för dyrbar utrustning ska fördelas mellan olika forskningsprojekt. Dessutom har universitetens finansieringsmöjligheter i många fall varit begränsade. Situationen är allvarlig och kommer att bli alltmer akut vartefter experimentell utrustning och lokala datormiljöer för teori måste förnyas.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Svensk forskning inom kondenserade materiens fysik är framstående i ett internationellt perspektiv, speciellt med hänsyn tagen till det relativt låga antalet innevånare i Sverige. Varningstecken saknas dock inte. I en Akademi rapport (Fostering breakthrough research: A comparative study, KVA, 2012) visar t.ex. Gunnar Öquist och Mats Benner att Sverige under de senaste 20 åren haft en svagare utveckling av forskning med stort internationellt genomslag än vad som varit fallet i Danmark, Nederländerna och Schweiz, vilket måste förmodas gälla även för den kondenserade materiens fysik. Genomslaget av artiklar publicerade av unga forskare, som tillkommit under senare år, är också lägre än i dessa tre länder, vilket tyder på att förnyelsen av svensk forskning inte varit lika framgångsrik som där. En möjlig orsak till detta skulle kunna vara en lägre grad av risktagning i forskningen då speciellt de yngre professorerna och lektorerna är beroende av löne- och basfinansiering genom bidrag från Vetenskapsrådet. Detta skulle kunna åtgärdas genom fakultetstjänster för professorer och lektorer med full löne- och basfinansiering för områden där universiteten vill vara forskningsledande.

En annan välkänd svaghet i det svenska forskningssystemet är avsaknaden av tydliga karriärvägar och bra villkor för de yngsta forskarna. Här skulle man, i enlighet med Öquist och Benners förslag, kunna tänka sig ett "tenure-track"-system med en stabil basfinansiering på en för ämnet relevant nivå, inledningsvis skött av Vetenskapsrådet i samverkan med universiteten.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Framsteg inom den kondenserade materiens fysik är extremt beroende av möjligheten att kunna tillverka nya material, som kan struktureras ned till atomär nivå. Dessutom behövs avancerad utrustning för att experimentellt och teoretiskt kunna analysera deras egenskaper. För detta krävs en väl fungerande infrastruktur både på nationell nivå och på universitetsnivå.



I dag utnyttjar forskare inom den kondenserade materiens fysik i Sverige ett brett spektrum av infrastrukturer och bidrar också till deras utveckling. Bland dessa kan nämnas SNIC (Swedish National Infrastructure for Computing), synkrotronljusanläggningar (bland annat ESRF - European Synchrotron Radiation Facility i Grenoble - och MAX-lab), neutronspridningsanläggningar (till exempel ISIS, ILL och i framtiden ESS) och renrumsfaciliteterna koordinerade av Myfab.

Infrastruktur behöver kontinuerligt utvecklas och uppdateras. Bland angelägna behov i dag kan bl.a. nämnas en struktur motsvarande Myfab för elektronmikroskopi med atomär upplösning. För materialframställning finns behov av den typ av utrustning med integrerad deposition/epitaxi och mätning in situ under ultrahögvakuum som nu utvecklas. Eftersom flytande helium i dag är en dyr bristvara finns också ett starkt behov av slutna kryostatssystem eller alternativa kylsystem med kringutrustning, särskilt för experiment vid extremt låga temperaturer.

## Teoretisk och matematisk fysik

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Den teoretiska fysiken utvecklar teorier och modeller som beskriver den faktiskt existerande fysiska verkligheten. Den matematiska fysiken har som mål att förstå den matematiska strukturen hos dessa teorier och modeller, men också att använda metoder och intuition från fysikaliska teorier och överväganden för att utveckla ny matematik. Den teoretiska fysiken spänner över ett vitt område från fenomenologiska studier relaterade till experimentella data, till rent matematiska studier av idealiserade modeller som man vet inte beskriver någon fysisk realitet. Motivationen för de senare är att studier av enkla modeller kan ge en kvalitativ förståelse av fenomen som karaktäriserar mer realistiska teorier, och historiskt sett har studier av matematiska modeller varit mycket viktiga. Var på skalan fenomenologi – modellstudier en aktivitet befinner sig, påverkar kravet på matematisk stringens. En god beskrivning av data kan vara av stort intresse, även om den inte är baserad på någon konsistent teori, medan studier av starkt förenklade modeller kräver matematisk stringens.

Genom dramatiskt förbättrad datorprestanda har numeriska beräkningar och simuleringar blivit allt viktigare verktyg inom den teoretiska fysiken. Denna utveckling berör många delområden och inkluderar till exempel simuleringar av gitterkvantfältteorier eller supernovaexplosioner, och studier av materialegenskaper med täthetsfunktionalteori.

Den del av den teoretiska och matematiska fysik som behandlas här innefattar: subatomär fysik, kosmologi, allmän relativitetsteori, astropartikelfysik, grundläggande kvantmekanik, kvantfältteori och kvantinformationsteori, den kondenserade materiens fysik, atom- och molekylfysik, statistisk fysik, komplexa system och biofysik.

### Styrkor och svagheter

I ett litet land är det ofrånkomligt att bara delar av den teoretiska och matematiska fysiken är representerade. Vad som karaktäriserar internationellt starka forskningsmiljöer i teoretisk fysik är inte stora grupper utan starka enskilda forskare med en gemensam teoretisk plattform för diskussioner och samarbeten. I Sverige finns få sådana miljöer då teoretikerna ofta är utspridda på institutionerna. Detta kan vara en styrka om det leder till samarbeten med experimenterare, men kan också bidra till en isolering som kan göra det svårare att ta till sig nya avancerade matematiska och teoretiska verktyg.

Nordita, Nordiska institutet för teoretisk fysik, spelar en utomordentligt viktig roll här och för nordisk teoretisk fysik i stort. Genom program, konferenser och skolor bidrar institutet till att sprida nya idéer och motverkar isolering. Teoretiska ämnen, som inte kräver stora infrastruktursatsningar, borde också kunna gå i bräschen för en utveckling som främjar en ökad rörlighet mellan lärosätena och en bredare internationell rekrytering. En positiv utveckling är möjligheten att anställa unga forskare på befodringsbara tjänster vilket ger möjlighet att tidigt knyta framgångsrika yngre forskare till institutionerna. Resurser för doktorander och postdoktorer till de ofta små verksamheterna inom teoretisk och matematisk fysik är viktiga. Den typ av forskning som bedrivs inom ämnet har ofta bara Vetenskapsrådet som potentiell nationell finansör och det

finns en risk att den konkurreras ut av projekt med mer tillämplad karaktär och/eller fler finansieringskällor. Småskaligheten gör också att man i många fall skulle vara väl betjänt av något mindre projektanslag än de som normalt ges av Vetenskapsrådet. Vinsten blir en ökad total bredd och mångsidighet av forskningen i ämnet.

En svaghet är att internationellt expansiva fält har liten representation i Sverige. Exempel är studier av ultrakalla gaser, grundläggande statistisk mekanik och teorin för mjuka material.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Inom den *subatomära fysiken och kosmologin* står Sverige starkt med internationellt uppmärksammas verksamhet. Lundamodellen för hadronproduktion, är en viktig del av ett standardverktyg inom internationell partikelfysik där Sverige fortsatt bidrar aktivt till utvecklingen vid den internationella frontlinjen. Att notera är dock att teori för ultrarelativistiska tungjonskollisioner nära nog saknas även om en del aktiviteter nyligen påbörjats. Om inga kandidater för supersymmetriska partiklar upptäcks vid LHC, eller om ingen mörk materia detekteras kan vi inom tio år befinna oss i en situation där de flesta av dagens modeller visat sig vara otillräckliga. I ett sådant läge kommer det att vara viktigt att ha kompetens att utveckla nya teorier i ljuset av resultaten från existerande teorier.

Det finns ett förnyat intresse för grundläggande *kvantmekanik och kvantinformation*. Utvecklingen inom senare tid har framförallt drivits av ny experimentell teknik inom optik, atom- och nanofysik. Fokus har här förskjutits från studier av system med ett litet antal frihetsgrader till mångpartikelsystem.

Elektronstrukturforskningen har en stark ställning i Sverige med internationellt starka grupper. Övrig verksamhet inom *teorin för den kondenserade materien* har ofta varit subkritisk, men under de senaste åren har en verksamhet inom supraledning och Diracmaterial byggts upp. Den kompletterar existerande verksamhet inom starkt korrelerade system och topologisk materia väl, men bärs fortfarande upp av ett fåtal personer. En intressant utveckling rör studiet av grafen där ett stort europeiskt projekt koordineras från Sverige.

Sverige har sedan länge en stark verksamhet inom traditionell *teoretisk atom- och molekylfysik*. Sedan man lyckats skapa kvantkondensat av ultrakalla gaser av både bosoner och fermioner, samt utvecklat metoder för att fånga atomer och joner har teoriverksamheten formligen exploderat. Till stor del rör det sig om simuleringar av olika system, men den mer konceptuella teoriutvecklingen har också varit viktig, exempelvis för förståelsen av den "unitära" gas som uppstår vid en kvantfasövergång mellan en supraledare och ett Bose-Einstein kondensat. Det finns anledning att tro att denna utveckling kommer att fortsätta, och det är oroande att teorin är svagt representerad i Sverige. Enskilda forskare bedriver mycket god verksamhet, men det finns inga starka större miljöer.

Svensk forskning inom icke-linjär och stokastisk dynamik och statistisk mekanik är stark. De teoretiska landvinningarna har i första hand skett genom exakt analys av förenklade modeller som sedan snabbt har funnit tillämpningar inom olika områden av fysik, biologi, och datavetenskap. God kontakt mellan matematiker och teoretiska fysiker är viktig och i det avseendet kunde Institut Mittag-Leffler komplettera Nordita i större utsträckning än vad som görs idag.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Den teoretiska kärnfysiken inkluderar kärnstruktur och kärnreaktioner, icke-perturbativa aspekter av kvantkromodynamiken (QCD), tungjonskollisioner och kvark-gluon faser. Sverige har en stark kärnstrukturtradition samt verksamhet inom QCD och kiral störningsteori. Med upptäckten av Higgspartikeln, har alla viktiga delar i standardmodellen för elementarpartiklar verifierats och intresset är nu fokuserat mot ny fysik vid högre energier. De teoretiska aktiviteterna inkluderar studier av supersymmetriska modeller, neutrinofysik, alternativa Higgssektorer och avancerad fenomenologi inom standardmodellen. I Sverige finns bra verksamhet inom teoretisk partikelfysik vid flera lärosäten.

Sedan mitten av 1980-talet har supersträngteorin varit en kandidat för en fundamental teori för materien. Trots begränsade framsteg på den fenomenologiska sidan, har strängteorin gett upphov till intressant matematisk fysik. Exempel är insikter i informationsparadoxen för svarta hål, samt nya metoder för beräkningar i starkt kopplade gaugefältteorier. Sverige har här en stark verksamhet.

Under de senaste decennierna har kosmologin genomgått en dramatisk utveckling. Big Bang scenariot är oomtvistat, och observationer av supernovor och bakgrundsstrålning visar att universum undergår en accelererande expansion och har med stor sannolikhet genomgått en period av exponentiell inflation. Det finns ännu ingen konsistent teori för inflationsepoken och tiden före denna. Teoretiska kosmologer utarbetar olika, ofta stränginspirerade, scenarion för inflation, och studier av kvantgravitation kan kanske kasta nytt ljus över den enigmatiske mörka energin. Forskningen i landet är stark.

Ett centralt problem inom astronomin och fysiken är att förstå mörk materia. Teoretiska astropartikelfysiker i landet kombinerar metoder från astronomi och partikelfysiken för att lösa detta problem.

Einsteins allmänna relativitetsteori, kompletterad med en liten kosmologisk konstant, ger en mycket god beskrivning av universums utveckling efter Big Bang. Teorin är också viktigt för att i detalj förstå t.ex. supernovaexplosioner, och svarta hål. Stark verksamhet finns i landet.

Trots att den icke-relativistiska kvantmekaniken var etablerad redan 1930, har viktiga resultat uppnåtts betydligt senare. Av vikt har varit olika versioner av Bells olikhet som preciserat skillnaden mellan klassisk fysik och kvantfysik, samt insikten att många kvantmekaniska fenomen kan formuleras i termer av Berryfaser. Sammanflätning är ett begrepp som fått förnyad aktualitet genom experimentella utvecklingar inom kvantoptiken, atom- och nanofysiken, och är central inom området kvantinformatik och kvantberäkningar. Även om ingen praktiskt användbar universell kvantdator ännu realiserats finns intressanta teoretiska resultat och tillämpningar inom kvantkryptografi och kvantsimuleringar. På den mer filosofiska sidan återfinns epistemologiska och rent matematiska studier av kvantmekanikens grunder och natur. God forskning inom dessa områden bedrivs i Sverige.

Studier av kvantfältteorier utgör en viktig del av det teoretiska arbetet inom atom-, kärn-, och partikelfysik, kosmologi, statistisk mekanik och den kondenserade materiens fysik och bedrivs vid många lärosäten.

Fortfarande saknas en grundläggande mikroskopisk teori för de exotiska supraledare som upptäckts sedan 1986, och intresset förblir stort då de är exempel på *starkt korrelerade kvantsystem*, ett område som ligger i forskningsfronten inom både teoretisk mångpartikelfysik och materialteori. Ett nytt intressant område som växt mycket kraftigt är studiet av topologiska isolatorer och supraledare. Många av de centrala teoretiska resultaten inom mesoskopisk fysik ligger långt tillbaka i tiden och verksamheten har internationellt förskjutits mot detaljerade studier av olika geometrier och design av kvantkomponenter. I Sverige finns stark verksamhet inom dessa fält.

Det finns en lång tradition av att utveckla metoder för att beskriva effekter av elektronkorrelation inom atomfysiken. Man arbetar också med att förfinas beskrivningar av atomära kollisioner och ultrasnabb dynamik i molekyler och atomer – i det senare fallet i attosekundsområdet. Dessa verksamheter är starka i Sverige. Internationellt sett är området ultrakalla gaser och optiska gitter mycket expansivt. Förutom att fördjupa förståelsen av kvantmekaniska kondensat, öppnas här möjligheten för alltmer sofistikerade *kvantsimuleringar*. Det är slående att den teoretiska verksamheten inom området i Sverige är rätt blygsam till omfånget.

Området statistisk fysik, komplexa system och biofysik är svagt representerat i Sverige även om enskilda forskare bedriver verksamhet av hög kvalitet.

Exakta lösningar av modellsystem är viktiga inslag i teoretisk fysik. Särskilt aktuell är idag stokastisk Loewner-evolution och Bethe-ansats. Dynamiken hos komplexa system ur jämvikt studeras med hjälp av slumpprocesser. Matematiker i landet har nått uppmärksammade resultat för tillväxtprocesser, med överraskande kopplingar till slumpmatristeori. Förgrenings- och koalescenta processer, med tillämpningar inom t.ex. infektionsdynamik, databassökning, och genetik, studeras nationellt och slumpgrafer analyseras framgångsrikt.

Icke-linjär dynamik är ett relativt nytt område som beskriver dynamiken i komplexa förlopp. Traditionellt har detta tillämpats på lågdimensionella system, men utvidgas nu mot högdimensionella sådana för att beskriva turbulens och magnetohydrodynamik. Stark forskning bedrivs i landet. Med förbättrade modeller och nya algoritmer studeras struktur, dynamik och evolution hos proteiner, inkluderande felveckning, med implikationer för exempelvis neurodegenerativa sjukdomar. Stokastisk dynamik i små biologiska system (som t.ex. enskilda celler) analyseras med matematiska metoder. Stark verksamhet finns i landet.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Infrastrukturen för ämnet utgörs av nationella och internationella nätverk och tillgång till kraftfulla datorer är av stor vikt (SNIC). Norditas verksamheten är mycket framgångsrik. Det kan inte nog betonas hur viktigt det är för svensk teoretisk fysik att Nordita får en tillräcklig och långsiktig finansiering, och att institutet behåller sin nordiska karaktär. Institut Mittag-Leffler är inriktad mot ren matematik men har haft program med teman inom matematisk fysik. Det är mycket viktigt att också detta institut ges en långsiktig stabilitet.

---

# GEOVETENSKAPER

---

## Övergripande områdesbeskrivning

Geovetenskap omfattar kunskaperna om jordklotets historia – från Jordens bildande till dagens antropogent påverkade värld – och om de processer som styr och samverkar i utvecklingen av jordklotets ”sfärer” d.v.s. geosfären, atmosfären, hydrosfären, kryosfären och biosfären. Vad som bestämmer denna utveckling och reglerar processerna utgörs av fysiska, kemiska och biologiska samband och lagar, varför fysik, kemi och biologi, tillsammans med matematik, utgör oundgängliga stödvetenskaper för geovetenskaperna. För att öka vår kunskap om interaktionerna mellan de olika delarna finns idag en stark trend mot en mer holistisk syn på geovetenskaplig forskning (”Earth System Science”), vilket också gör det svårt att avgränsa ämnesöversikterna. Särskilda insatser bör därför göras för att stödja grundläggande forskning om jordsystemet som helhet samt dess samverkande delar.

Ett hållbart utnyttjande av naturresurser är nödvändigt i strävan mot en hållbar samhällsutveckling. Detta har ökat betydelsen och intresset för ämnesområdet och forskningen om klimatet, dess historia, variabilitet och förändring har fått ökad aktualitet. Exempelvis har den av tradition starka svenska geovetenskapliga forskningen i polarområdena fått en kraftigt ökad relevans som en följd av dessa områdens känslighet och betydelse för globala klimatförändringar. Att vidmakthålla en vital och nydanande geovetenskaplig grundforskning är därför mycket angeläget.

Grundläggande atmosfärforskning är av central betydelse för många viktiga samhällsfunktioner t.ex. transporter, matproduktion, energiproduktion, vattentillgång, luftkvalitet och säkert boende. Atmosfären är starkt beroende av omgivande land, hav och även ekosystem varför en helhetssyn är nödvändig för tillförlitligare väderprognoser och bättre förståelse av klimatets variabilitet, känslighet och utveckling. Förståelsen av atmosfäriska processers betydelse för klimatet och deras känslighet för antropogena och förändrade naturliga emissioner är av största vikt, exempelvis i Arktis. Fördjupat internationellt samarbete, inte minst inom Europa, samt strategiska satsningar av statsmakterna har höjt den svenska kunskapsnivån och har varit mycket värdefullt genom att det blivit möjligt att koncentrera mer resurser till fokuserade vetenskapliga insatser.

Exogen geokemi är ett viktigt forskningsfält inom både geovetenskap och miljövetenskap. Geokemiska nyckelprocesser sker vid olika oorganiska och/eller organiska gränssytor och är därmed ofta avgörande i de olika geokemiska kretsloppen, vilket bestämmer den kemiska sammansättningen t.ex. i hav, mark och luft. Vikten av att förstå dessa gör att ämnet både är teknik- och teoridrivande i vid naturvetenskaplig bemärkelse. Forskningen greppar över många skalor, från den molekylära via ekosystem till global nivå, och omfattar de flesta grundämnen, deras kemiska former och isotoper. Den är ofta baserad på fleråriga fältarbeten kopplat med laborieförsök. Detta kräver långsiktiga projektbidrag och goda resurser för fältinstrument.

Geologi och geofysik omfattar studier av Jordens fysikaliska och kemiska sammansättning samt dess fysikaliska egenskaper och de fysikaliska fenomen som är förknippade med Jorden och dess omgivning. Således utgör dessa paraplyämnen till ett flertal områden inom geovetenskap. Ämnens centrala ställning för förståelsen av planeten Jorden medför också att samhällsrelevansen är stor, speciellt vad gäller råvaror, energi, klimat och hållbar utveckling, med en åtföljande expanderande arbetsmarknad. Forskningsmässiga trender karakteriseras ofta av samarbete över traditionella ämnesgränser och nya satsningar på ökad integration mellan process- och fältorienterade studier och modellering. Kärnan av ämnesområdet tenderar därför att knoppa av nya expanderande forskningsfält. Tillgång till avancerade forskningsplattformar och deltagande i internationella provtagningsprogram som IODP och ICDP är också av stor vikt för ämnesområdets utveckling.

Svensk forskning inom oceanografi-hydrologi-glaciologi sker oftast i relativt små grupper vid flera universitet. Forskningens karaktär, och också dess styrka, utgörs av en kombination av fältverksamhet, med fokus på processförståelse, fjärranalys och modellering på olika avancerade nivåer. Verksamheten är till stor del inriktad på grundvetenskapliga frågeställningar både globalt och regionalt i Sverige med omgivande hav, ibland med direkta tillämpningar på aktuella frågor inom centrala samhällssektorer som hushåll, areella näringar och industri. Av särskild betydelse är forskning om Östersjön, Nordatlanten samt i polarområdena.

Forskning riktats även mot klimatrelaterade frågor, inkluderande behov av åtgärder inför framtida möjliga klimatförändringar.

## Atmosfärvetenskap

### Beskrivning av forskning inom ämnet

Atmosfärforskningen kännetecknas av stor spännvidd i tids- och rumsskala och sträcker från det globala till det mikroskopiska. Den omfattar processer från den globala atmosfärcirkulationen till småskaliga processer som konvektion, turbulens och utbyten vid jordytan, strålning samt molnbildning, och vidare ned till nanoskalan, t.ex. bildning av atmosfäriska partiklar. Atmosfärens kemiska sammansättning är en funktion av utbyte av gaser och partiklar mellan luft, hav, land och biosfär samt atmosfäriska kemiska och fysikaliska processer.

Antropogena emissioner påverkar atmosfären på lokal och global nivå, från markytan till stratosfären, vad gäller dess innehåll och funktion. Förbättrad kunskap om såväl emissioner av naturliga och antropogena källor som om processer i atmosfären på alla skalor är nödvändig både för att förstå klimatförändringar på kortare tidsskalor och för att möta samhällets behov av planering och av prognoser för klimatet och för extremt väder. Denna kunskap är även avgörande i åtgärder mot luftföroreningar, som fortfarande är ett av de största folkhälsoproblemen i Europa. Den atmosfärvetenskapliga forskningen kan uppdelas i följande forskningsfält:

#### Atmosfäriska processtudier

I Sverige pågår forskning om viktiga atmosfärprocesser över ett brett fält. Området omfattar såväl småskaliga processer, t.ex. turbulens och utbytesprocesser vid jordytan, bildning av moln och aerosoler samt dessas dynamik, kemi och samverkan med moln, som processer på större skala, t.ex. transportprocesser och variabilitet på regional och hemisfärsskala, och stormar på mellanbreddgrader. I allt större grad kopplas processtudier över olika skalor och integreras med modellstudier och observationer, vilket leder till ytterligare ökad kunskap om både processerna och systemet som helhet. Forskningen har hög kvalitet och syftar främst till ökad förståelse för återkopplingar och känslighet i systemet samt till att förbättra numeriska modeller.

#### Atmosfärkemi, luftkvalitet och klimat

Atmosfärkemisk forskning utvecklar kunskap om processerna som påverkar bildning, omvandling och spridningen av gaser och partiklar i atmosfären av såväl naturliga som antropogena substanser. Här utgör simuleringsverktyg för bedömning av utsläppsprocesser, konsekvenser av luftföroreningar såsom effekter på hälsa, ekosystem och matproduktion, en viktig forskningsinriktning. Atmosfäriska aerosoler är ett dynamiskt trefasssystem, vars sammansättning styr bildning och tillväxt av partiklar samt dessas inverkan på bildningen av molndroppar. Samspelet med moln inverkar kraftigt på aerosolerna, deras koncentration, kemiska sammansättning, storlek och livslängd i atmosfären. Denna forskning sammanfaller även med behoven inom klimatforskning, eftersom den bristande kunskapen om aerosol-moln samspelet bidrar kraftigt till osäkerheten i nuvarande klimatmodeller. Forskningen har en stark experimentell sida med kontinuerliga mark- och satellitbaserade observationer, intensiva fältkampanjer med mätningar bland annat från flyg och fartyg, och laboratorieexperiment. Observationer och experiment i fält, liksom laboriestudier, är inriktade på specialstudier av olika processer och används oftast för att utvärdera processmodeller samt regionala och globala modeller.

#### Mellanatmosfäriska studier

Grundläggande forskning om processer i mellanatmosfären (stratosfären och mesosfären) pågår inom ett antal framgångsrika och internationellt inriktade forskargrupper. Här kan speciellt nämnas mätningar av vattenånga från Odin-satelliten och molnstudier inom ramen för samarbetet inom ESA. Centrala målsättningar inom denna svenska mellanatmosfärforskning rör fysisk-kemiska processer kring atmosfärens sammansättning och moln, inklusive växelverkan med jonosfärens laddningar. Ett centralt inslag är användandet av mätserier för studier av

atmosfärens variabilitet samt kopplingar till vågdynamik, den storskaliga atmosfärs-cirkulationen och rymdväder.

#### Utbyte av gaser och partiklar mellan atmosfär, hav och vegetation

Sverige intar en ledande position när det gäller forskning om utbytet av koldioxid med vegetationen, där såväl empiriska som teoretiska studier bedrivs. En avancerad modell som nu ingår i de senaste klimatmodellerna har utvecklats gemensamt av forskare i Lund, Jena och Potsdam. Satsningen på långtida kolflödesobservationer, ICOS, kommer att ge en viktig bas för utveckling av observationerna till en rad andra komponenter, t.ex. organiska gaser vilka kraftigt påverkar den naturliga kemiska sammansättningen av atmosfären. Andra viktiga områden, där Sverige också är ledande, är forskning om emissioner av metan från våtmarker, permafrost och från det Arktiska havet. Den forskning som studerar kopplingen mellan moln och det mikrobiologiska livet i hav och is i den Arktiska havsbassängen är unik.

#### Kopplad atmosfär- och oceandynamik samt klimatmodellering

Samhällets tilltro till och förmåga att använda projektioner av framtida klimatutveckling beror på en nöjaktig förståelse av alla relevanta processer på alla skalor och hur dessa inkluderas i modeller av hela klimatsystemet. Detta inkluderar den komplicerade och icke-linjära samverkan mellan naturliga och antropogena emissioner och dess inverkan på biogeokemiska kretslopp, småskalig dynamik, den storskaliga cirkulationen i hav och atmosfär samt kopplingen mellan dessa på både synoptisk och planetär skala. Klimatsystemets komplexitet innebär att effekten av enskilda processer ofta uppträder på oväntade sätt och propagerar genom systemet på sätt som kräver avancerade kunskaper i och förståelse i för icke-linjär dynamik för att kunna följa. Detta gäller särskilt för extrema händelser, vilka är av stor betydelse för samhället, t.ex. extrem torka och värmevågor, extrem nederbörd och översvämningar och extrema vindar. Denna forskning bedrivs och bör bedrivas huvudsakligen genom internationella samarbeten p.g.a. modellernas komplexitet och krav på omfattande infrastruktur för uppbyggnad och drift.

#### Styrkor och svagheter

En central faktor i utvecklingen är den ökande integrationen både mellan modeller och observationer samt mellan olika inriktningar. Av stor betydelse är allt mer detaljerade observationer genom hela atmosfären, från jordytan till 100 km höjd, och en motsvarande utveckling av alltmer avancerade modeller för simuleringar. En tydlig styrkefaktor är det aktiva nationella och internationella samarbetet, vilket är ytterst viktigt då de svenska forskningsgrupperna allmänt sett är små. En annan styrkefaktor är samarbete mellan olika forskningsdiscipliner vid samma universitet inom ramen för riktade målsättningar inom miljö- och klimatforskning. Samtidigt har dock svensk universitetsforskningen kring data-assimilering och väderprognosmodeller försvagats vilket har negativa effekter på meteorologiutbildningen. Även den experimentella atmosfärkemiforskningen har försvagats p.g.a. frånvaro av nysatsningar på nödvändig infrastruktur.

Svensk atmosfärforskning har varit stark när det gäller empiriska undersökningar och fältexperiment, men det senaste decenniets tydliga satsningar på klimatforskning och klimatmodellering har inneburit ett trendbrott då det gäller kapacitet och kompetens inom forskning kring systemets dynamik; ett flertal nya seniora forskartjänster har tillkommit i denna process. Centrala forskningsområden, såväl teoretisk som experimentell forskning om atmosfärens och havens dynamik samt sambandet mellan dessa och småskaliga processer som molnprocesser och turbulens, behöver nu ett utökat stöd för att denna satsning skall kunna konsolideras.

#### Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Satsningar på forskning inom atmosfärvetenskap har varit fundamentala för den position och omfattning som finns i dag. Det är av utomordentligt stor betydelse att finansieringen av denna blir långsiktig, så att den strategiska uppbyggnaden, som bland annat omfattar internationell rekrytering av ett flertal seniora experter, kan konsolideras och inte förtvinar av brist på resurser för grundforskning. Atmosfärforskningen kräver en

kombination av verktyg, med laboratorieförsök, observationer från fältstudier och observatorier, från fasta observationsnätverk, regionala och globala fjärranalys system och modellering, vilket ställer stora krav på ökade resurser till observationsnätverk och plattformar, dataprocessering och dataåtkomst, och simuleringskapacitet.

De olika universitetsgrupperna är små och valet av ledande personer i de olika grupperna har visat sig ytterst betydelsefullt. Det är därför utomordentligt viktigt att nyrekryterade forskare inom de strategiska satsningarna inte hämmas av brist på medel; risken för kompetensflykt blir då överhängande. Det internationella samarbetet är av stor betydelse varför medel för resor och gästprofessorprogram är viktiga. Satsningen på klimatmodellering har möjliggjort ett för området stort antal nya dedicerade seniora lärartjänster vid universiteten, inom områden som atmosfär- och oceanmodellering på alla skalor, och även inom processtudier och modellering samt fjärranalys. Motsvarande strategiska satsning på s.k. e-Science (SeRC) har tillfört kapacitet inom beräknings- och datalagring. En nyckelfaktor för fortsatt utveckling är en samverkan mellan klimatmodellering och analys av modellresultat mot observationer på alla skalor, från satellitobservationer över observationsnätverk till fältmätningar. Detta kräver en fortsatt satsning på modellering men också på långsiktiga observationer både *in situ* och med fjärranalys.

Utvecklingen av olika globala eller jordsystemmodeller (ESM, Earth System Model) har varit utomordentligt viktig, speciellt utvecklingen av jordsystemmodellen EC-Earth inom ett Europeiskt konsortium och det nordiska samarbetet kring NorESM. Pågående betydelsefulla infrastruktursatsningar är ICOS för långtidsobservationer av kolcykeln och radarsystemet EISCAT-3D för jonosfärforskning med kopplingen till atmosfär/klimat och processer på solen. Dock saknas betydande infrastruktur inom övrig experimentell atmosfärkemi.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Atmosfärforskningen i Sverige genomgående har utvecklats positivt under senare år genom väsentligt utökad internationellt samarbete, en högre grad av integration av forskningen inom landet, samt en koncentration av forskningen på utvalda forskningsområden. Statsmakternas strategiska satsning på klimatmodellering i vid bemärkelse har inneburit en fokusering och kompetensuppbyggnad inom området. De enskilda forskningsgrupperna är relativt små i internationell jämförelse men förbättrade tekniska möjligheter, och gemensamma nationella strategiska forskningsprogram, har inneburit att man uppnått en kritisk massa inom olika kompletterande områden.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Atmosfärens komplexa natur ställer mycket stora krav på både observationssystem och modeller som nu arbetar med en allt högre upplösning och global utsträckning. Detta förutsätter inte bara hög beräkningskapacitet utan också avancerade datalagrings- och dataåtkomstsystem. Atmosfärforskningen har avsevärt förstärkts genom satsningen på klimatmodellering. Två centra har skapats; Bolincentret för klimatforskning vid Stockholms universitet och MERGE i Lund, båda med omfattande samarbeten med t.ex. Kungl. tekniska högskolan och Göteborgs universitet samt Rossby Centre på SMHI. Med denna satsning är det på sikt nödvändigt att stärka infrastrukturen när det gäller tillgång till data och modellresultat. Detta behov bör täckas genom en nationell långsiktigt hållbar tillgång på kraftfull beräkningsinfrastruktur samt ett internationellt samarbete och utbyte, p.g.a. de mycket stora satsningar som görs och gjorts internationellt på området.

Av särskild betydelse för den framtida utvecklingen är ett ökat stöd till experimentell infrastruktur, både permanenta stationer för kontinuerliga observationer, som t.ex. ICOS, ACTRIS, Ny-Ålesund och Abisko, och plattformar för laboratorie- och fältexperiment. Radaranläggningen EISCAT-3D är en kommande infrastruktur som ökar möjligheterna för mellanatmosfärforskning. Det bör dock framhållas att idag är det främst genom internationella samarbeten fältexperimenten kan genomföras, främst p.g.a. brist på inhemsk infrastruktur. Isbrytaren Oden är kanske den enda svenska plattformen som kan användas för troposfärsstudier.



# Exogen geokemi

## Beskrivning av forskningen inom ämnet

Exogen geokemi är ett internationellt snabbt växande ämne inom geovetenskap. Detta är delvis en följd av att nya tekniker och att ny teoribildning öppnar för möjligheter att förstå geokemiska processer på ett nytt grundvetenskapligt sätt. Delvis beror tillväxten i Sverige också på ämnets centrala roll i Global Change-problematiken, där ämnet har varit framgångsrikt i Vetenskapsrådets tidigare satsning på klimat och hållbar utveckling. Behovet av att integrera över olika skalor, från molekylär nivå till ekosystem och landskap och vidare till till subkontinentala och globala skalor, för att förstå inverkan av klimatförändringar, eutrofiering etcetera har ökat. Geokemister har traditionellt anlagt ett holistiskt synsätt där reaktioner och flöden av grundämnena studeras på alla tids- och rumsskalor med olika kemisk komplexitet. Den exogena geokemin har därför en god beredskap för att anta de utmaningar som globala och lokala miljöproblem skapar. Exogen geokemi intar därför en central roll inom grundläggande miljöforskning.

Grundämnen omfördelas ständigt mellan olika reservoarer. För att förstå hur Jorden fungerar geokemiskt, inklusive den antropogena påverkan, måste vi förstå hur grundämnena är fördelade och hur och när de förflyttas mellan reservoarerna. Det centrala problemet inom geokemin är att ”bestämma fördelningen och förekomstformer av grundämnena på Jorden och orsakerna därtill”. Kunskap om dessa formers struktur, termodynamik och kinetik i geokemiska miljöer är alltså nödvändig.

Exogen geokemi studerar de kemiska processer som sker vid jordytan där atmosfären, biosfären, hydrosfären och litosfären möts. Det faktum att naturen är ett multifas-system betyder att många av dessa processer sker vid olika oorganiska och/eller organiska gränssytor. Speciellt viktigt är därför studier av geokemiska processer som sker vid olika gränssytor och längs gradienter. Ämnet består av en rad forskningsfält och tangerar flera ämnen, bland annat hydrologi, limnologi, ytkemi, marin kemi, atmosfärskemi, ekologi och mikrobiologi. Biologiska processer är centrala inom den exogena geokemin vilket har lett till att hela forskningsfältet ofta kallas för biogeokemi.

## Styrkor och svagheter

Den biogeokemiska forskningen i boreala och arktiska miljöer är stark i Sverige. Svenska forskares publicering inom fältet är betydande och internationellt erkänd. Forskningen omfattar både kontrollerade studier av modellsystem på laboratorium och processer i fält. Syftet är att få en fundamental förståelse av transport, fastläggning, omvandling och biotillgänglighet av metaller, icke-metaller och organiska föreningar under naturlig och antropogen inverkan. Här ingår studier av klimatförändringar som idag skapar snabba förändringar främst i de boreala och arktiska zonerna. Hypotesdriven processinriktad biogeokemisk forskning på molekylär nivå, inom vilken avancerade tekniker som t ex synkrotronbaserad spektroskopi och isotopinmärkning utgör viktiga verktyg, ger idag avgörande bidrag till förståelsen av en rad miljövetenskapliga frågeställningar.

Geokemiska projekt har genomförts på flertalet av de polarexpeditioner som organiserats med svenska isbrytare som arbetsplattformar. Samarbetsprojekt med ryska forskare plattformar har också skapat utrymme för unika möjligheter för svenska geokemister att nå nya områden runt Arktis. Publiceringen inom detta forskningsfält är alltid mycket internationellt uppmärksammat.

Forskningen om geokemiska cykler i Östersjön, särskild de som är kopplade till biologiska processer, har fått en omfattande internationell uppmärksamhet. Inom ramen för EU:s BONUS-program genomförs internationella samarbetsprojekt, med hög kvalitet, om geokemiska cykler Östersjön. Andra exempel på problemorienterad forskning är studier av förorenad mark, gruvavfall och kärnbränsleförvaring, som i grunden är studier av geokemisk vittring i den boreala zonen. Sjöarnas biogeokemi och paleogeokemi samt geokemiska processer i sediment och jordprofiler ingår också.

Stor verksamhet inom exogen geokemi är observerande och fältorienterade, och har därför svårt att på samma sätt som för laboriebaserad forskning vara hypotesdriven. Kontrollerade experiment i fält är svåra att genomföra och det krävs ofta en kombination av fält- och laboriestudier. Detta är både en intellektuell och en ekonomisk utmaning.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

### Breddning av kompetensen

Forskare från hela världen, med bakgrund i kemi, mikrobiologi och ekologi, rör sig mot den exogena geokemin. I Sverige befinner sig ämnet därför i en dynamisk utvecklingsfas. Antalet forskare som kallar sig biogeokemister ökar, vilket är en direkt följd av behovet av denna form av expertis, främst inom olika delar av den klimatrelaterade forskningen. Breddning och samordning med närliggande kompetenser är en framträdande utvecklingstrend.

### Ökad samordning

Jordsystemet [”Earth System (Science)”] och ”geoengineering” är relativt nya begrepp, som har sitt ursprung i förståelsen av och praktiska åtgärder mot klimatförändringar och andra miljöförändringar. Båda begreppen verkar på en landskapsskala och kräver kunskaper i exogen geokemi. Denna skala ställer höga krav på samverkan mellan de olika geokemiska forskningsfälten i samordnade forskningsprojekt. Exempel på framgångsrik samordning av geokemisk kompetens är ett flertal Arktisexpeditioner, BONUS och det nordiska spetsforskningsinitiativet NECC och den av Vetenskapsrådet finansierade infrastruktursatsningen ICOS.

### Fördjupad processförståelse på molekylär nivå

Den exogena geokemiska forskningen i Sverige fokuserar alltmer på nanoskalan för att på molekylär nivå studera geokemiska processer. Komponentspecifik isotopanalys och spektroskopiska tekniker har det senaste decenniet inneburit ett genombrott för studier av molekylära processer inom flera av de geokemiska forskningsfälten. Svenska geokemister är väl framme när det gäller utnyttjandet av dessa tekniker. Organisk geokemi är eftersatt i Sverige, men studier av biomarkörer och organisk isotopgeokemi (molekylspecifik isotopanalys) är ett växande forskningsfält.

En tydlig trend är att exogen geokemi går mot en mer tvärvetenskaplig karaktär, där forskningen fordrar samarbete mellan geovetenskaper, kemi, biologi, och i allt högre grad, även ämnen som mikrobiologi och genetik. Granskningsprocessen vad gäller ansökningar till olika forskningsfinansiärer gynnar inte alltid tvärvetenskapliga projekt då de ofta inte passar in på de områden som normalt finansieras. Dessutom är tvärvetenskaplig forskning, med krav på tillgång till de allra senaste analysteknikerna från flera områden, dyrare i jämförelse med projekt som har ett tydligt fokus på ett enskilt ämne. Härvidlag är det också viktigt att utrymme också skapas för en ökad satsning på grundläggande geokemisk forskning om olika grundämnen och deras isotopsystem.

Det finns en unik utvecklingspotential för grundläggande exogen geokemisk forskning i Sverige, eftersom det finns en rad ekosystem med relativt liten mänsklig påverkan. Östersjön erbjuder både bentiska och pelagiska redoxbarriärer som kan studeras med relativt små logistiska resurser. Det finns en koppling till forskning i Arktis med redan etablerade provtagningsplattformar. Äspölaboratoriet är ett världsunikt svenskt berglaboratorium med etablerad forskningsinfrastruktur för provtagning, analys och akademiskt arbete. Slutligen så kommer satsningen på MAX IV att innebära stora möjligheter för svenska geokemister att utveckla flera av forskningsfälten i exogen geokemi.

### Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Svenska forskare inom exogen geokemi publicerar regelbundet i internationella tidskrifter och samarbetar i internationella nätverk. Flera forskare är internationellt erkända och publicerar i de mest ansedda tidskrifterna.

Kompetensen i exogen geokemi i Sverige är spridd på flera universitet och högskolor. Olika specialkompetenser finns vid de olika universiteten och lärosätena. De kompletterar ofta varandra. Den samlade kompetensen inom exogen geokemi i Sverige är därför relativt hög, men samordningen av dessa kompetenser

kan stärkas. I stort sett har forskningen i exogen geokemi haft tillgång till avancerade analysinstrument och lämpliga provtagningsplattformar. Detta har medfört att forskning i den absoluta forskningsfronten har kunnat genomföras. Med en förstärkt och uthållig finansiering har en rad svenska geokemister potentialen att bli internationellt ledande i flera forskningsfält inom den exogena geokemin.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Skapa samordnade uthålliga forskningsområden för grundläggande exogen geokemisk forskning i Sverige. Forskning under det senaste decenniet har visat att spårelement kan spela stor roll för olika biogeokemiska processer i de globala elementcyklerna. Mycket få längre mätserier med spårelement är dock mätta med hög upplösning och hög kvalitet. Det finns därför ett behov att genomföra ”base-line”-mätningar både i havet och på land för spårelement och olika isotopsystem. Forskningsprogrammet GEOTRACES är ett exempel på behovet av noggranna bestämningar av spårelement och isotoper. Kvalitetssäkrade ”base-line”-mätningar är viktiga för tolkningen av geokemiska processer och är därför en viktig komponent inom grundforskningen.. Stöd för ”base-line”-studier av spårelement och isotoper, på samma sätt som har beviljats för biosfärs-atmosfärs-utbyte, på landskapskala är viktigt för grundforskningen i exogen geokemi i Sverige.

Utvecklingen under det senaste decenniet inom analysteknik omfattar bl.a. masspektrometri vilket har försett forskarna med nya möjligheter att bestämma isotopkvoter med hög precision hos element där detta tidigare varit mycket svårt. Under senare år har även tekniker för mikrospektroskopisk analys och mikroavbildning utvecklats kraftigt och utgör idag ett allt viktigare verktyg inom många geovetenskapliga forskningsområden

## Ökad närvaro i Arktis

Anslaget till Polarforskningssekreteriatet bör ökas för att garantera uthållig närvaro i Arktis för svenska forskare. Sverige har här möjligheten att bli världsledande i en globalt viktig geosfär med högaktuella geokemiska frågeställningar. Detta gäller även för forskning om terrestra ekosystem och forskning med fokus på sedimentära lagerföljder i både marina ekologiska system och sötvattenssystem

## Medeldyr utrustning

Det behövs medel för reparationer eller inköp av provtagningsutrustning i nästan varje geokemiskt projekt. Sådana kostnader kan vanligen inte täckas av projektbidrag från statliga finansiärer.

# Geologi och geofysik

## Beskrivning av forskning inom ämnet

Geologi och geofysik omfattar studier av planeten Jorden och spelar en allt större roll, både för förståelsen för och för lösningen av flera stora globala samhällsutmaningar såsom: (i) klimatförändringar, (ii) hållbar energiförsörjning, (iii) urbanisering och (iv) hållbar naturresursanvändning.

Geologin studerar Jordens fysikaliska och kemiska sammansättning samt evolutionen hos de djur och växter som bevarats som fossil. Jordens tidigaste historia studeras ofta genom material från meteoriter och andra delar av solsystemet. Jorden med dess sfärer (liv, luft, vatten, is, fasta jorden) utgör ett dynamiskt, samverkande system, ”Jordsystemet”, stadd i ständig utveckling. Det finns idag en stark trend mot en mer holistisk syn på geovetenskaplig forskning vilket också återspeglas i en förändring av hur ämnen definieras. Geologi står som paraplyämne för ett antal delämnena, såsom mineralogi, petrologi, paleontologi, malmgeologi, tektonik, strukturgeologi, kvartärgeologi, maringeologi och geomorfologi. Den traditionella uppdelningen av olika delämnena kan till del ifrågasättas då t.ex. den traditionella kvartärgeologin idag ofta indelas i eller ryms under paleoklimatologi och glacialgeologi.

Geofysik är den gren av fysiken som omfattar forskning om Jordens fysikaliska egenskaper samt de fysikaliska fenomen som är förknippade med Jorden och dess omgivning. I vid mening ingår ämnen som meteorologi, rymdfysik, hydrologi och oceanografi i geofysik, men här avses den snävare definitionen av geofysik som den fasta jordens fysik. Även inom geofysiken förekommer ett antal delämnena som till exempel prospekteringsgeofysik, tillämpad geofysik, seismologi, paleomagnetism och geodesi.

## Styrkor och svagheter

Forskningsmiljöer av hög internationell kvalitet finns idag inom dryga dussinet delområden, där kvartärgeologi, paleontologi, planetär geologi, maringeologi och geofysik hör till de mer framträdande. Delområden som berggrundsgeologi, malmgeologi och petrologi har försvagats jämfört med tidigare decennier, men är på god väg att revitaliseras genom nytänkande, ekonomiska nysatsningar och omprioritering av forskningsstrategier.

### Styrkor

Vissa delområden har alstrat internationellt uppmärksamhet och påverkat forskningsfronten. Gemensamma yttre faktorer är att sådana delområden ofta haft tillgång till starka experimentella miljöer, god infrastruktur och unika forskningsplattformar samt att de deltar i internationella nätverk. År 2014 hör följande delområden till denna kategori: Kvartärgeologi (med fokus på paleoklimat); paleontologi (där ny teknik utnyttjas som till exempel biomarkörer, DNA-sekvensering och molekylärbaserad data från fossila djur och växter); maringeologi (studier av havsbottensediment, paleoklimatrelaterad forskning); geofysik (seismik, elektromagnetism och potentialfältsstudier); planetär geologi (mindre forskargrupp inom meteoritforskning och astrobiologi)

Ämnet rymmer ett antal andra delområden som representerar starka och produktiva forskningsmiljöer, som malmgeologi, paleomagnetism, seismologi, tektonik och geodynamik, paleogeografi/limnologi/oceanografi samt geomorfologi. Några av ovanstående delområden har en längre tradition av framgångsrik forskning. De excellenta forskningsmiljöerna har delvis också uppstått ur ett mer processorienterat förhållningsätt, där de traditionella ämnena tenderar att lösas upp och forskningen blir mer tematisk än ämnesmässig.

### Svagheter

Ämnets delområden drivs ofta av små forskargrupper, vilket innebär att delområdena är nischade till olika lärosäten, och delvis underkritiska. Ämnet, som får betraktas som litet i jämförelse med många andra naturvetenskapliga ämnesområden, men står förhållandevis starkt publiceringsmässigt i global konkurrens och stödet från forskningsfinansiärer står därför inte i proportion till ämnets vetenskapliga genomslag och samhällsrelevans. En konsekvens är att t.ex. berggrundsgeologi, som trots sin viktiga roll för stora samhällsutmaningar, minskat i betydelse vid flera lärosäten på grund av svårigheter att finna finansiering för grundforskning. Flera discipliner har blivit mer behovsmotiverade i sin forskningsinriktning och sökt annan finansiering än den som traditionellt varit tillgänglig (malm- och miljögeologi, tillämpad geofysik m.fl.). Geodesi, geodynamik, mineralogi, och strukturgeologi är exempel på områden där forskningen minskat i omfattning vid svenska lärosäten.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Endogena och exogena geologiska processer utgör grunden för förståelsen av hur klimatet utvecklats över tid (paleovetenskaperna). Förnybara energisystem använder i allt högre grad s.k. kritiska metaller och en tryggad försörjning av dessa skapar förutsättningar för gröna energilösningar (malmgeologi, tillämpad geofysik m.fl.). En allt mer urbaniserad värld är naturresurskrävande och kräver i allt större utsträckning planering av markanvändning (berggrunds-, kvartär- och miljögeologi) och en hållbar utveckling inom naturresursområdet kräver en holistisk systemsyn där de flesta geovetenskaper kommer att få en större betydelse.

Globala trender inom geologi och geofysik knyter an till de stora globala samhällsutmaningarna och blir mer process- och lösningsorienterade. Samhället formar sig för att möta utmaningarna i större sammanhållna,

multidisciplinära och internationella forskningsprogram, där svenska forskare inom vissa områden är väl framme, men där det finns stor förbättringspotential inom andra. I takt med att forskningen blir mer lösningsbaserad så blir grundforskningen globalt mer behovsmotiverad, som ett komplement till den essentiella grundläggande och nyfikenhetsbaserade forskningen. Starka globala trender inom geovetenskap är att undersökningar, mätningar och forskning avseende geologiska processer sker i alltmer extrema miljöer som t.ex. djupare i jordskorpan och på havsbottnarna. En annan tydlig trend är att många av ämnets delområden alltmer gör mätningar och modelleringar i tre och fyra dimensioner vilket kräver avancerade beräkningsmodeller, visualisering och datorkraft.

Gemensamt för flertalet ovan nämnda styrkeområden är vissa utvecklingstrender såsom: (i) ökande andel forskning som överskrider traditionella ämnesgränser, (ii) ökande integration av process- och fältorienterad forskning med modellering, särskilt inom klimat och miljöområdet, (iii) ökande behov av starka experimentella miljöer och tillgång till unika forskningsplattformar och (iv) ökad internationalisering och medverkan i större internationella forskningsprojekt och program.

Samhället påverkas av naturkatastrofer och av hälsorisker förknippade med geologiska material (miljögeologi och medicinsk geologi är områden på stark frammarsch). Vissa slag av naturkatastrofer kan antas öka i framtiden, och för riskförebyggande åtgärder krävs fördjupade kunskaper om geologiska processer och system.

Den sedimentära berggrunden utgör ett arkiv över utvecklingen av Jordens klimat och levande organismer. Ocean- och sjösediment samt iskärnor har bidragit till att skapa en skarpare kunskapsbild om klimatets globala utveckling och utgör viktiga paleoklimatarkiv även i framtiden.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Ämnet saknas i läroplanen på grundskola och gymnasium och har inte alls den forskningsvolym som dess samhällsrelevans motiverar. Inom ämnet finns ändå världsledande forskargrupper som lyckats forma slagkraftig forskning runt teman som varit attraktiva ur finansieringssynpunkt och också i bred bemärkelse bidragit och bidrar till att tackla nutida samhällsutmaningar ur ett grundforskningsperspektiv. Paleontologin står i dag starkt speciellt inom den evolutionära ämnessektorn, inte minst tack vare de trender som nämnts ovan, och förmågan att integrera geologi och biologi.

Berggrundsgeologi är underkritiskt representerat vid flera svenska lärosäten men har delvis ändå en stark internationell ställning bl.a. genom det Nordiska jonmikroskop-laboratoriet (NORDSIM) vid Naturhistoriska riksmuseet. Ämnet har fortsatt att utvecklas positivt sedan senaste ämnesöversikten publicerades 2010.

Mineralogiämnet ställning vid svenska lärosäten har under senare år försvagats. Detta är problematiskt både i forsknings- och utbildningshänseende, eftersom mineralogi utgör en viktig basvetenskap. Mineralogin har globalt fått ett uppsving genom tillämpningar mot miljögeologi, mineralteknik och metallurgi, en trend som ännu inte fått fullt genomslag i Sverige.

Maringeologi har en lång tradition i Sverige och svensk forskning inom ämnet har varit världsledande. Under senare år har området delats upp och koncentrerats på djuphav och polar maringeologi resp. mot grundhavsområden, skärgårdar och fjordar. Generellt är ämnet maringeologi, trots mycket goda förutsättningar och inom vissa områden ledande forskning, underkritiskt i Sverige.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Tillgång till infrastrukturresurser som forskningsplattformar och adekvata analysinstrument har gjort det möjligt för svenska geovetare att kunna bidra med forskning av högsta internationella kvalitet. En fortsatt gynnsam utveckling av svensk geovetenskap förutsätter tillgång till minst fem större infrastrukturresurser:

(1) Mikroanalys och avbildningsteknik med extremt hög upplösning gör det idag möjligt att utföra kemiska analyser och avbildningar på sub-mikrometernivå. Ett nationellt mikroanalys-center, Vegacenter, är under uppbyggnad och detta bör kompletteras med ytterligare avancerad utrustning för avbildning och spektroskopi. Det är också angeläget att NORDSIM tillförsäkras resurser för fortsatt drift.

(2) Kärnboringar och borrhålmätningar på land, i sjöar och till havs inom International Continental Drilling Program (ICDP) och Integrated Ocean Drilling Program (IODP) är viktiga för svensk geovetenskap. Svensk geovetenskaplig forskning gynnas påtagligt av fortsatt engagemang i såväl ICDP som IODP. ICDP borrar i svåråtkomliga geologiska miljöer och Vetenskapsrådet har nyligen investerat i en ny borrhplattform för landbaserade vetenskapliga djupboringar. Sådana kärnboringar och övervakningsprogram bör ses som en infrastruktursatsning som kraftfullt skulle stärka svensk berggrundsgeologi och geofysik.

(3) Svensk polarforskning har tack vare tillgång till Oden, en Arktisklassad forskarisbrytare, nått en ledande internationell position. Ett bibehållande av denna mycket starka ställning förutsätter att Odens utrustning och mätinstrument kommer att drivas rationellt som en nödvändig infrastrukturresurs. Samordning kring fartygsresurser är viktigt.

(4) Systematiska naturhistoriska samlingar utgör en allmänt tillgänglig kunskapskälla om Jordens och livets uppkomst och senare utveckling samt de processer som kontinuerligt (om)formar vår planet. Till detta kommer kärnrepositorier för prover från berggrund, malmer, oceanbottnar och de stora inlandsisarna. Det saknas kvalificerad överblick över vilka samlingar som finns i Sverige. Ämnet är inom många områden beroende av långa mätserier och tillgång till olika geologiska miljöer. Det är därför angeläget att säkra fortsatt finansiering av fasta anläggningar och forskningsstationer samt databaser.

(5) Inom geofysiken har kraftfulla investeringar i långbasinterferometri och ett nytt seismiskt nät under senare år givit Sverige en instrumentering som är bland de bästa i världen. Dessa ingår eller är tänkta att ingå i de internationella samarbetena IVS och European Plate Observing System och det är viktigt att framtida finansiering tryggas.

## Oceanografi, hydrologi och glaciologi

### Beskrivning av forskning inom ämnet

Under senare år har geovetenskaplig forskning inom oceanografi, hydrologi och glaciologi kompletterats med ett Jordsystemtänkande [”Earth System (Science)”] vilket påskyndats av bl.a. klimatproblematiken.

Geovetenskaplig forskning bygger till stor del på fältstudier. Bara genom att kombinera långa tidsserier och goda teoretiska modeller kan man avgöra om observerade förändringar över tiden orsakas av ändrade randvillkor, exempelvis p.g.a. mänsklig aktivitet, eller av naturliga variationer i det komplexa Jordsystemet.

*Oceanografi* omfattar studier av marina processer, såväl fysiska som geokemiska. Forskningen sker i form av fältobservationer, teoretiska studier och modellberäkningar, ofta med inriktning på aktuella miljö- och klimatfrågor. Svensk oceanografisk forskning är huvudsakligen inriktad mot havsområdena runt Sverige och Antarktis samt Arktis. Forskning bedrivs idag främst vid universiteten i Göteborg, Stockholm och Lund samt vid SMHI.

*Hydrologin* belyser frågor om tillgänglighet, fördelning, cirkulation och egenskaper av vatten på Jorden men också utbyte av vatten, ämnen och energi mellan jordytan och lufthavet. Forskningen i Sverige bedrivs vid de flesta större universitet och högskolor samt SMHI, och omfattar processförståelse, till stor del baserad på experimentellt arbete, och dess applikation inom numerisk modellering och modellutveckling. Forskningen har tillämpningar mot flera viktiga socioekonomiska sektorer som hushåll, areella näringar, industri, miljösektor, samt konsekvenser av och åtgärder inför framtida klimatförändringar.

*Glaciologi* omfattar studier av is i alla dess former och har i Sverige en fokusering kring hur klimatet påverkar storleken av glaciärer och inlandsisar, samt hur isens temperatur och smältvatten påverkar isarnas rörelsedynamik. Rekonstruktioner av paleoklimat görs med iskärnstudier. Det finns en lång tradition av att studera förändringar av glaciärerna i norra Sverige, men även inlandsisarna på Antarktis och Grönland samt glaciärer i Arktis omfattas av studierna. Glaciologisk forskning bedrivs vid universiteten i Stockholm och Uppsala.

## Styrkor och svagheter

### Styrkor

Svensk oceanografi står internationellt stark inom oceancirkulationsmodellering och polarforskning där isbrytaren *Oden* varit en viktig plattform sedan 1990. Insamlade data har lagt grunden för processtudier av vattenmassors bildning, cirkulation och omvandling samt ökat förståelsen av utbyte av värme och gaser genom havsytan och frys- och smältprocesser kopplade till både havsis och shelf-is. Numeriska modeller har använts för att studera oceancirkulationen, både rena oceanmodeller och kopplade klimatmodeller, och nya teoretiska metoder för sådana studier har utvecklats. Framgångsrik forskning har också bedrivits om hur viktiga småskaliga processer, t ex vertikal omblandning, ska beskrivas i sådana cirkulationsmodeller. Studier av bl.a. turbulens och blandning i kustvatten samt oceanografisk systemmodellering i Östersjön, Skagerrak/Kattegatt samt fjordar står sig också internationellt starkt. Modellerna utvecklas kontinuerligt genom förbättrade beskrivningar av processer viktiga för förståelsen av exempelvis övergödning och försurning. Framgångsrik forskning utförs också inom fysikaliska kustprocesser med fokus på samspelet mellan vågor, strömmar och sedimenttransport. Svenska forskare har varit attraktiva deltagare i många stora EU-projekt och i samarbeten med forskare från länder utanför EU.

I Sverige bedrivs framstående forskning om det hydrologiska systemet innefattande vattnets väg genom mark och sprickigt berg, hydrokemiska transport- och reaktionsprocesser, samt matematisk modellering av dräneringsområden. Under senare år har forskning som rör klimatförändringen fått ökat fokus med stark forskning om markhydrologins roll för utbyte av vatten och växthusgaser med atmosfären. Det senare arbetet bedrivs i samarbete med markbiologer och geokemister. Forskningen kring vattenbalanser i stor skala (nationellt, regionalt och globalt) har fått ett uppsving både genom koppling till globala atmosfäriska och oceanografiska modeller och p.g.a. stora globala vattenproblem. De snabbt ökande kostnaderna för hydrometeorologiska naturolyckor/naturkatastrofer, i Sverige främst översvämningar och jordskred, har också drivit fram kraftfull forskning kring hydrologiska extremhändelser. Hydrologins betydelse inom modern geovetenskaplig forskning visas genom stort deltagande i många strategiska forskningssatsningar, profilområden och EU-projekt.

Svensk glaciologiforsknings roll internationellt stärktes fram t.o.m. genomförandet av det Internationella Polaråret. Under ca. 30 år har studier av den Antarktiska inlandsisen skett genom internationellt samarbete i den Atlantiska sektorn med fokus på dels isens dynamik, dels på interaktionen mellan atmosfär och kryosfär. Svenska forskare har även planerat och deltagit i arbetet med att analysera iskärnor från både Antarktis och Grönland. Framgångsrik glaciologisk forskning under svensk ledning har även bedrivits på Svalbard.

### Svagheter

Avsaknaden av ett större dedikerat fartyg begränsar svensk oceanografisk fältforskning till ett fåtal områden. Vårt bidrag till storskaliga oceanografiska fältstudier bygger på tillgång till isbrytaren *Oden*. Utan denna resurs skulle svensk fältforskning huvudsakligen ske i vattnen kring Sverige.

Den stora betydelsen av hydrologin inom många forskningsområden kan samtidigt utgöra orosmoment genom en gradvis försvagad inomvetenskaplig utveckling. Det finns en risk att förnyelsen brister och hydrologin blir fragmenterad om den huvudsakligen efterfrågas som stödverksamhet för andra discipliner och inte ges utrymme för egen utveckling.

Antalet forskare i glaciologi är förhållandevis litet och forskningen kräver en omfattande logistik. Forskningen är därför känslig för förändringar i infrastruktur och finansiering.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Trenden mot forskningssatsningar inriktade mot Jordsystemtänkande inom oceanografi, hydrologi och glaciologi har fått mycket stort genomslag i Sverige.

Två nya trender är tydliga inom hydrologin. Den ena är kopplingen mellan den naturliga vattencykeln och den antropogena påverkan på denna liksom den ömsesidiga kopplingen mellan samhället och den hydrologiska

cykeln. Vid flera lärosäten har fokus inom den hydrologiska forskningen under senaste tiden vänt sig mot vattenförvaltning och andra tillämpningar, till exempel för att optimera vattenkraften i en tid av förändrad klimat- och landskapsanvändning. Den andra trenden gäller utvecklingen av osäkerhetskalkyler. När sådana fastlagt vilka huvudorsakerna är till osäkerheterna kan dessa minskas genom förbättrade mätmetoder och modeller.

Inlandsisarna är av central betydelse i analyser av hur ett framtida klimat kan förändra livsbetingelserna på jorden. En kollaps av Västantarktis och en avsmältning av södra Grönland kan höja Världshavet med drygt 5 m. Studier av hur inlandsisarna förändras med tiden samt vilka processer som är verksamma är därför av stor betydelse. Svenska oceanografer studerar numera processer i havet som kan bidra till ökad avsmältning av inlandsisarna.

Med ökande risk för negativa effekter på klimat och miljö av mänsklig påverkan bör utvecklingspotentialen för de geovetenskapliga ämnena vara mycket stor. Det är fortfarande många processer i hav, atmosfär, isar och hydrologiska system på land som är dåligt kända och som behöver förstås och beskrivas bättre för att klimat- och miljömodeller skall beskriva de naturliga systemen mer realistiskt och därmed få förbättrad prediktionsförmåga. Detta kräver ökande insamling av observationer, både för att testa modellresultat och för fördjupade processtudier.

Kostnaderna för infrastruktur ökar allt mer vilket hotar att begränsa tillgängligheten och därmed möjligheten till ny fältverksamhet. Tillgången till mätstationer, om än ofta småskaliga, är en förutsättning för verksamheten samtidigt som kostnaderna för dem ofta ligger mer i själva etableringen, underhållet och driften än inköpspriset.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Framstående forskning bedrivs i polarområdena inom hela forskningsfältet. För den oceanografiska forskningen har isbrytaren *Oden* varit en viktig plattform som möjliggjort för svenska forskare att vara med i den internationella forskningsfronten vad gäller fältstudier för ökad processförståelse. Teoretiska och matematiska modeller har utvecklats för studier av till exempel storskalig och regional oceancirkulation. Den framgångsrika svenska oceanografiska kustvattenforskningen har utvecklat processförståelse och modeller som blivit viktiga avnämarverktyg.

Ledande forskning bedrivs i Sverige med fokus på det hydrologiska systemet innefattande vattnets väg genom mark och sprickigt berg, hydrokemiska transport- och reaktionsprocesser, samt matematisk modellering av dräneringsområden och fysikaliska kustprocesser. Storskalig vattenbalansmodellering har vuxit fram som ett nytt svenskt styrkeområde inom hydrologin liksom mätning och modellering av hydrologiska extremhändelser, båda med direkt koppling till meteorologin. Osäkerhetsanalys är ett område där hydrologin har gått i spetsen. Framstående forskning i glaciologi bedrivs med fokus dels på isens dynamik, dels på interaktionen mellan atmosfär och kryosfär. Forskning bedrivs även för att finna lämpliga positioner för borrhining av iskärnor vilka är viktiga för forskning kring paleoklimat.

Restaurering av exempelvis klimatsystemet genom geoengineering diskuteras numera internationellt och det är viktigt att det finns kompetens i Sverige som med vetenskapliga metoder kan analysera konsekvenserna av olika åtgärder. I ljuset av bl.a. detta är det viktigt att stödet till de involverade hydrodynamiskt baserade kärnämnen ökas till tidigare nivåer. Annars är risken stor att befintlig kompetens inom atmosfärens, havens och vattnets cirkulation kraftigt utarmas.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

För oceanografiska fältstudier är forskningsfartyg en förutsättning men bristen på lämpliga svenska fartyg har varit ett stort problem under många år. Situationen för kustnära forskning har varit relativt god liksom för polarforskning där isbrytaren *Oden* är en världsledande plattform, vilken dock p.g.a. resursbrist inte kunnat utnyttjas till fullo av svenska forskare. En ny organisation, med uppgift att hyra in (ej äga) och tillhandahålla lämpliga fartyg, skulle kunna lösa oceanografernas långvariga problem.

Inom ICOS har en omfattande nationell, nordisk, europeisk och internationell infrastruktur byggts upp. Den fokuserar på kolbalanser och i viss mån energibalanser. Det skulle vara bra om ICOS infrastruktur kunde



kompletteras med specifika hydrologiska delar. För den glaciologiska forskningens insamling av material från områden som Antarktis krävs en omfattande logistik och har därför huvudsakligen skett i internationellt samarbete, vilket bör fortsätta. Den svenska infrastrukturen för detta har oftast skett inom ramen för Polarforskningssekretariatets resurser, och en fortsättning av detta stöd är en förutsättning för att vidmakthålla denna del av svenska glaciologi. Arbeten på Grönland och Svalbard är beroende av liknande resurser i fält, men transportfrågan är i dessa fall enklare.

## Övergripande områdesbeskrivning

Kemins stora roll i dagens natur- och teknikvetenskap baseras på den molekylära världsbild som vuxit fram under det senaste seklet. Livets processer beskrivs alltmer i molekylära termer. Dagens material, med anpassade funktioner, är oftast skapade med en molekylärt baserad syntes. Med ett sådant perspektiv är kemin centralt placerad inom naturvetenskapen och har dessutom starka kopplingar till den tekniska utvecklingen. Dagens kemi är en egen vetenskap, med en solid grund i fysik och matematik, och med konsekvenser för biologi, medicin, geovetenskap, miljövetenskap och teknik. I den molekylära världen finns en mångfald, vars komplexitet kan illustreras med livet som vi känner det. För att hantera denna komplexitet använder kemisten i huvudsak angreppssätten syntes, analys/karaktärisering, modellering, och experimentella och teoretiska studier av molekylär växelverkan/omvandling.

Det faktum att kemin står mitt i naturvetenskapen innebär att den har en viktig roll i många aktuella samhällsfrågor, som klimat, miljö, energi, naturresurser och hälsa. Landvinningar inom biokemi, organisk, analytisk och teoretisk kemi leder till nya läkemedel som motverkar resistens, minimerar bieffekter och reducerar doser genom optimal formulering. Design av oorganiska, metall-organiska och organiska material med specifika egenskaper är ett växande verksamhetsområde för kemister. Nya tekniska lösningarna för energiomvandling (bränsleceller, artificiell fotosyntes) och energilagring (batterier) baseras på kunskap om molekylära processer och bygger på forskning inom bl.a. fysikalisk och oorganisk kemi. Kemisk forskning och kunskapsuppbyggnad kring nanopartiklar och deras växelverkan med omgivningen är också en förutsättning för ett effektivt och säkert användande av den snabbt expanderande nanoteknologin.

Gemensamt för alla dessa tillämpningar av kemiska kunskaper på av samhället efterfrågade problemlösningar är att de förutsätter en samverkan med andra vetenskapliga discipliner. En sådan samverkan är i grunden en stark drivkraft för att föra området framåt, men samverkan bör ske med en tydlig rollfördelning mellan de olika parterna. Det finns en risk att kemin enbart blir ett stödämne för andra snabbt växande discipliner främst inom medicin och att detta kan utarma den inomvetenskapliga tillväxten. Här har forskningsfinansiärer en mycket viktig funktion att fylla genom att ge en stabil ekonomisk bas för ämnesdjup så att tillämpningsdrivna forskningsprojekt fortsatt kan dra nytta av den höga ämneskompetensen inom kemi.

Svensk kemisk forskning har genom åren stått stark i ett internationellt perspektiv. En positiv faktor av långsiktig betydelse har varit att forskarstuderande rekryterats såväl via naturvetenskapliga, tekniska som medicinska utbildningar. Idag har den naturvetenskapliga kemiutbildningen svårigheter med att rekrytera studenter och för både tekniska och medicinska utbildningar sker en förskjutning mot en mer målinriktad yrkesutbildning där de mer grundläggande aspekterna på ämnet får mindre utrymme, vilket kan få negativa konsekvenser för forskningen.

Modern kemisk forskning är helt beroende av tillgång till mätinstrument av flera olika slag. Under senare år har det blivit allt svårare att få bidrag till nyanskaffning av apparatur i prisklassen 0,5–10 miljoner kronor, och behoven av förnyelse har blivit mer och mer akuta. Ansvaret för finansiering av lokalt använd apparatur ligger numera på lärosätena, men hittills har deras insatser på många håll varit begränsade. Detta är en fråga som måste finna en lösning snarast. Frågan är också kopplad till optimalt utnyttjande av storskaliga forskningsanläggningar såsom kommande MAX IV och ESS, eftersom dessa förutsätter tillgång till lokalt baserad utrustning lämpad för kompletterande studier.

## Biokemi

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Biokemi är läran om livets kemi. I en levande cell samverkar och omvandlas små och mycket stora molekyler i en myriad välkoordinerade biokemiska processer som styr cellens liv. Biokemi syftar till att förklara dessa

processer på en molekylär nivå. Detta inbegriper hur cellen föds, utvecklas och organiseras, använder och förvaltar det genetiska materialet, delar sig, smälter samman, sköter sin energiomsättning, försvarar sig mot yttre hot och reparerar skador, åldras, samt hur den kommunicerar med andra celler och i övrigt fyller en funktion i sin miljö.

Forskning i biokemi fokuserar idag på

- att förstå relationen mellan biologiska molekylers tredimensionella struktur och deras funktion (strukturbiologi).
- Att förstå hur de proteiner som återfinns i cellens olika membraner fungerar. Till membranproteiner hör bland annat receptorer för hormoner och andra signalsubstanser, jon- och vattenkanaler och proteiner som transporterar näringsämnen och metaboliter in och ut ur cellen.
- att utveckla nya metoder för biokemiska analyser (analytisk biokemi). Sedan år 2000 har det skett en snabb utveckling av analysmetoder för storskalig forskning i biomedicin. Man kan nu kartlägga de komplexa biokemiska nätverk genom vilka intracellulär och intercellulär signalering sker och näring bryts ner samt hur 100-tals mindre molekyler som behövs som byggstenar, energikällor eller signalsubstanser i cellen syntetiseras (metabolism).
- att förstå hur proteiner antar sin rätta tredimensionella struktur (proteinveckning). Detta är ett centralt forskningsfält då felveckade proteiner orsakar allvarliga sjukdomar.
- utvecklandet och användandet av statistiska metoder för analys av mycket stora mängder genetiska och biokemiska data och strukturdata (bioinformatik).
- att förstå biokemisk energiomvandling (bioenergetik), till exempel hur växter utnyttjar solens ljus för att omvandla vatten och koldioxid till syre och organiska molekyler (fotosyntes). Biokemisk energiomvandling är dessutom central för förståelsen av metabolisk förbränning som är intressant för produktion av biobränslen.
- proteinteknik (även kallat ”protein engineering”) som syftar till att uppnå nya önskvärda egenskaper såsom stabilitet, ny enzymatisk katalys, specifik igenkänning/bindning.
- att förstå biokemiska reaktioner på atomär nivå. Här kombineras enzymologi och strukturbiologi med beräkningar och datorsimuleringar (teoretisk biokemi).

## Styrkor och svagheter

Svensk biokemi av årgång 2014 håller fortfarande god internationell standard, bland annat inom strukturbiologi, membranproteiner, teoretisk biokemi, bioenergetik och proteinveckning. Stark svensk biokemisk forskning förekommer också i större program inriktade mot biomedicin eller bioteknisk utveckling. Svenska forskargrupper är dock i de flesta fall små- eller i många fall mycket små-jämfört med situationen i andra europeiska länder och i USA. En orsak till detta är bristande resurser vid fakulteterna. Ett annat problem är de jämförelsevis små bidrag som erhålls i nationell konkurrens, t.ex. från Vetenskapsrådet. Till detta kommer i ett internationellt perspektiv kostsamma doktorandanställningar, vilka begränsar möjligheterna att bygga upp större grupper som kan tackla komplexa frågeställningar. Det är därför delvis överraskande att svenska forskare fortfarande håller hög internationell klass. Ett intryck är att svenska forskare i biokemi, om än starka, saknar den flexibilitet och de positiva drivkrafter som krävs för att växa sig ännu starkare, i ett internationellt perspektiv. Strukturbiologin är stark i Sverige, även om den totala omfattningen antagligen inte har ändrats under de senaste femton åren. Dominansen beror delvis på att strukturbiologi är ett kraftfullt forskningsredskap, men även på att andra biokemiska forskningsfält, som till exempel forskning inom metabolism och enzymologi, har minskat i omfattning. Flera svenska strukturbiologer är internationellt uppmärksammade för utveckling av ny teknologi baserad på synkrotronljus och ny metodologi för att framställa proteiner för strukturbiologiska studier. Fortsatt stark svensk strukturbiologisk forskning är relativt väl tillgodosedd via nyinvesteringar i instrumentering och uppgradering och underhåll av befintlig infrastruktur.

Under lång tid har svenska forskare inom biokemi etablerat stark verksamhet för studier av proteiners veckning. Under de senaste tio åren har denna verksamhet kompletterats med undersökningar av felveckning

och dess samband med sjukdomar, och är nu en omfattande svensk biokemisk forskningsdisciplin. En styrka med svensk forskning i fältet är att den i flera fall är tätt sammanknuten med medicinsk forskning av hög kvalitet. De svenska forskare som är verksamma i teoretisk biokemi är i flera fall internationellt ledande fysikaliska och teoretiska kemister.

Den bästa teoretiska biokemin återfinns inom större forskningsprogram som även omfattar experimentella studier och som syftar till en helhetssyn på någon biologisk process, till exempel proteinsyntes och inom läkemedelsforskning (småmolekyldesign). Svensk forskning kring membranproteinernas biokemi håller synnerligen hög klass och omfattar strukturbioologiska studier för att förstå hur membranbundna enzymer fungerar, utveckling av nya metoder för biofysikaliska studier, framställning och rening, samt forskning kring hur membranproteiner antar en tredimensionell struktur på cellytan. I ett läge där hjärnans kemi (neurokemi) och behandlingen av neurologiska sjukdomar, exempelvis demenssjukdomar, framstår som en av de stora utmaningarna är det viktigt att grundläggande biokemisk kompetens bibehålls och försätter att utvecklas vid svenska universitet.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

En tydlig trend är en förskjutning av kompetens och frågeställningar mot biomedicin och bioteknik. Biokemiska metoder och främst analytisk biokemi utnyttjas i teknikplattformar för medicinsk forskning. Dessa plattformar används dels för forskning i genomik, proteomik och metabolomik, (forskning som syftar till kartläggning av olika geners funktion och vilka proteiner och mindre molekyler som förekommer i olika celler och vävnader), dels för medicinsk profilering, vilket innebär studier av hur sammansättningen av till exempel proteiner och mindre molekyler korrelerar med utveckling, åldrande eller olika patologiska tillstånd.

En annan viktig trend är kemisk biologi. Inom detta fält samverkar forskare med biokemisk, organisk-kemisk och cellbiologisk expertis och i viss mån oorganisk kemi (nanokemi). Kemisk biologi har etablerat sig som ett nytt koncept för biologisk forskning och möjliggör biokemiska experiment direkt i levande celler. Utvecklingen har under många år skett vid främst universitet i USA, men även flera svenska forskare arbetar med framgång inom detta fält. Kemisk biologiforskning sker ofta i stark samverkan med syntetisk organisk kemi. Utvecklingen av molekylärbiologi, bioinformatik, biokemi och kemisk biologi under de senaste åren har lett till forskningsdisciplinen syntetisk biologi varvid syntetiska nukleinsyror framställs för att omprogramera eller helt/delvis ersätta cellens maskineri för proteinsyntes. Detta kan användas för att skräddarsy ”syntetiska organismer” med önskade egenskaper.

Ytterligare en trend är svenskt deltagande i bredare forskningsprogram och större nätverk, s.k. ”translationell” forskning. Dessa syftar ofta till att studera biologiska processer ur ett helhetsperspektiv, d.v.s. från organism till molekylära processer, eller omvänt, från biokemiska mekanismer till ett specifikt sjukdomstillstånd.

Biokemins framgång och tillämpning inom angränsande fält innebär både ett hot och en möjlighet för områdets utveckling. Biokemins styrka som förklaringsmodell och biokemiska forskningsmetoders användbarhet innebär en möjlighet för svenska biokemister att bidra till forskning som syftar till en helhetsförståelse av biologiska eller medicinska frågeställningar. För en framtida positiv utveckling av biokemi i Sverige krävs att svenska forskare fortsatt och i allt större utsträckning samverkar i internationella forskningsprogram. I samma möjlighet finns ett inbyggt hot, i det att biokemister skiftar fokus från frågeställningar inom kärnämnet och från institutioner för biokemisk grundforskning till nya tillämpade områden och andra institutioner. I många fall följer forskningsfinansieringen med i denna förskjutning. Grundvetenskapen blir lidande då fokus är storskaliga experiment utan den klassiskt reduktionistiska hållning som är och har varit framgångsrik. Man kan urskilja en urholkning av biokemins kärna. På sikt kan urholkningen innebära försvagad grundkompetens vid biokemi-institutionerna och därmed förstärka en ond spiral i form av sämre utbildning, rekrytering och forskning. Inte minst är detta en trend bland yngre forskare, som attraheras av moderna holistiska trender inom storskalig genomik och proteomik. Då de framgångsrika tillämpningarna av biokemi till stor del baseras på grundforskning så kan denna utveckling leda till försvagningar även inom den bredare biovetenskapliga och medicinska forskningen. En lösning är att med framtida forskningsfinansiering stärka just kärnämnet biokemi.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

I ett historiskt perspektiv har svensk forskning i biokemi varit utomordentligt framgångsrik. Mycket av denna framgång nåddes via intim samverkan mellan företag och akademien. En stor del av den tekniska utvecklingen som möjliggjorde separation av biologiska makromolekyler och cellkomponenter ägde rum i Sverige. Svensk biokemisk forskning var under ett halvt sekel åren från 1920 till 1970 mycket stark i ett internationellt perspektiv, och till och med världsledande inom fält som analytisk biokemi och enzymologi. En stor del av Sveriges biotekniska och farmaceutiska industri har sitt ursprung i denna forskning som tyvärr mattats av under 2000-talet. Under 1970- och 1980-talen upprätthöll Sverige en stark position i biokemi, nu kompletterad med forskning i bioenergetik och strukturbiologi.

Svensk biokemi är även idag mycket stark som sammanfattats ovan, men har förlorat sin starkaste internationella slagkraft på grund av en ökande omvärldskonkurrens, små och utspridda bidrag i kombination med ökande kostnader, samt ett minskande engagemang från svenskt näringsliv.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Det behövs en fortsatt diskussion om och hur större laboratorier av nationell karaktär ska finansieras med avseende på uppgraderingar, underhåll och drift. Värduiversiteten för respektive nationell infrastruktur är ytterst ansvarig för dessas finansiering. Till dessa laboratorier hör MAX-lab i Lund som utnyttjas för strukturbiologi och Svenskt NMR-centrum i Göteborg som utnyttjas för flera typer av biokemisk forskning. Svenska forskargrupper inom strukturbiologi arbetar dessutom i stor utsträckning med infrastrukturer inom andra Europeiska länder. Sedan något år fokuseras ytterligare infrastruktursatsningar inom biokemi till SciLifeLab i Stockholm och Uppsala. Satsningen på SciLifeLab har möjligen varit positiv för storskalig genomik och i viss utsträckning inom screeningverksamhet. Dock har betydelsen för biokemisk grundforskning varit av modest nationell karaktär och bedöms i dagsläget vara av regionalt och fokuserat intresse där värdskapet är distribuerat över fyra universitet.

Majoriteten av biokemisk forskning sker vid de svenska universiteten i mindre forskargrupper. Finansiering av infrastrukturen för forskning i biokemi vid svenska universitet är fortsatt ett problem och befintlig äldre instrumentering är i akut behov av underhåll och uppgradering. Möjligheter till finansiering av basutrustning i kostnadsintervallet en halv till tio miljoner kronor är mycket begränsat. Till och med inom stora forskningscentra med flera representerade fakulteter och/eller universitet kan det saknas fungerande basinstrument. Denna situation är ett uppenbart hot, men å andra sidan ett problem med tydliga lösningar. Lösningen som på olika lärosäten är under uppbyggnad är att samla instrumenteringsansvar i ”core facilities” för samverkan av införskaffning, användande samt underhållskostnader. Finansieringen är däremot oklar och i dagsläget undermålig.

## Fysikalisk och analytisk kemi

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Fysikalisk och analytisk kemi har gemensamt att det är en huvudlinje i forskningen att tillämpa fysikalisk metodik för att studera molekylära kemiska fenomen, koncentrationer och sammansättningar. I forskningen inom den analytiska kemin sker problemval utifrån en tydlig målinriktning mot en analytisk frågeställning och verksamheten vilar på en statistisk grund. Det gäller att finna nya eller förbättra etablerade metoder för att möta specifika analytiska utmaningar. Dessa kan gälla kvalitativ analys, för att identifiera molekylslag, eller kvantitativ analys, för att så exakt som möjligt bestämma mängden av ett visst molekylslag oftast i mycket komplexa prover. En tredje viktig del av den analytiska kemin är separation där det gäller att få fram ett eller flera molekylslag i ren form ur en blandning. I kontrast till den analytiska kemin är de centrala forskningsfrågorna inom den fysikaliska kemin i grunden bestämda av en inomvetenskapligt motiverad strävan att förstå molekylära egenskaper och processer. Med en förståelse som bas skapas sedan tillämpning av kunskaperna på konkreta problem inom naturvetenskap och teknik. Analytiska och fysikaliska kemister

använder i stort samma typ av mätmetoder, medan skillnaderna i vetenskapligt perspektiv leder till att man använder dessa metoder på olika sätt.

## Styrkor och svagheter

Den analytiska kemins stora styrka har varit och fortfar att vara dess användbarhet. Den spelar en central roll i samhällsekonomiskt viktiga sammanhang som teknisk processkontroll, bioteknisk separation, miljöövervakning, marksanering, medicinsk diagnostik och läkemedels- och livsmedelsproduktion. Den får också ständigt ökande betydelse som stöd för andra vetenskapliga verksamheter och då främst den molekylära biologin, men även miljövetenskap och metrologi, där analytiska tekniker för att i rum och tid följa och avbilda mycket komplexa kemiska förlopp utvecklas snabbt. Denna rikedom på tillämpningar medför att det finns ett stort behov av analytiska kemister utbildade på masters- såväl som doktorsnivå.

Under senare år har vi sett en svårighet för den analytiska kemien att hävda sig forskningsmässigt inom akademien, både inom och utom Sverige. Institutions- och avdelningssammanslagningar har medfört att analytisk kemi inte längre finns som ett tydligt identifierat forskningsämne vid flera universitet i Sverige. Denna trend kan avspeglas också i en minskande finansiering av forskare i ämnet från Vetenskapsrådet. Det finns anledning till viss oro för återväxten.

En tydlig trend inom kemien är att allt större vikt läggs på studiet av samverkan mellan molekyler via intermolekylär växelverkan. Den fysikaliska kemien har en central roll att spela i denna utveckling. I Sverige faller forskningen i ämnet inom tre huvudområden. Ett antal grupper har fokus på spektroskopisk metodik, och då inte minst tidsupplöst laserbaserad spektroskopi (femtosekundsspektroskopi) för studier av molekylära energi- och elektronöverföringsreaktioner. Detta sker från ett fundamentalt såväl som ett tillämpat perspektiv, där utveckling av solceller och annan solenergiteknik med sikte mot de stora energitmaningarna står i centrum. Ett antal andra grupper har den intermolekylära växelverkan som fokus för att förstå molekylär association i vätskefas och på fasta ytor. Denna forskning, oftast under benämningen yt- och kolloidkemi, är mer problemorienterad och använder ett spektrum av metoder som kärnresonansspektroskopi (NMR), ljusspektroskopi, spridningsmetodik och termokemisk metodik. En tredje inriktning, biofysikalisk kemi är också brett företrädd och ofta med sin bas i de två föregående. Här studeras framför allt biokemiska och molekylärbiologiska fenomen och processer med hjälp av fysikalisk kemisk metodik. Denna forskning flyter ofta samman med den mer problemorienterade biokemiska, molekylärbiologiska och medicinska forskningen. Forskningen i Sverige står stark i alla tre delområdena, sett i ett internationellt perspektiv.

Som en omedelbar konsekvens av att somliga områden är starka finns det också ett antal forskningsfält inom den klassiska fysikaliska kemien som är svagare representerade i landet. Detta gäller till exempel studiet av heterogen katalys, som i Sverige i huvudsak sker inom ramen för ytfysik och kemiteknik samt studiet av reaktionskinetik i gasfas. För ett antal spektroskopiska metoder som IR-spektroskopi, Ramanspektroskopi, elektronspinnresonans och cirkulärdicroism gäller att metoderna tillämpas, men utan att vara centrala i forskningsverksamheten. Elektrokemisk forskning är främst representerad med tillämpat perspektiv som för biosensorer inom analytisk kemi eller kombinerat med fotokemi inom solcellsforskningen och för bränsleceller inom kemiteknik.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

### Analytisk kemi

Under det senaste decenniet har det skett stora framsteg inom kvalitativ och kvantitativ analys av prover av biologiskt ursprung. Man kan idag i gynnsamma fall detektera enskilda molekyler i mycket små volymer. En utvecklingslinje kommer att vara att utvidga klassen av molekyler som kan detekteras på enmolekylnivå. En annan utmaning är att ta fram metodik för kvalitativ analys av, företrädesvis, biologiska makromolekyler med mycket hög spatial och temporal upplösning i komplexa prover. Här spelar metodutveckling inom masspektrometri en stor roll och Sverige har en flera framstående verksamheter inom detta fält. Idag finns rutinmetoder för sekvensbestämning av nukleinsyror med hundratalet enheter närvarande i mycket små

mängder. Ett pågående intensivt arbete gäller att förbättra metodiken så att den ger säkra analyser av längre sekvenser. Det är idag tydligt att kemiska modifieringar av baser i nukleinsyror och av aminosyror i proteiner har en viktig funktionell roll. En stor utmaning är att göra en kvalitativ analys med avseende på kemisk modifikation av de ingående monomerenheterna. I Sverige finns idag forskning av hög klass i detta forskningsfält. Det är dock en svårighet att få en riktig överblick över detta fält då mycket av forskningen sker inom formellt andra discipliner som bioteknologi och molekylärbiologi. Sammanfattningsvis finns det ett stort behov av och utvecklingspotential i analytisk kemisk grundforskning inom separations-, detektions- och dataanalyismetoder.

### Fysikalisk kemi

Det går att urskilja ett antal trender för utvecklingen av ämnet inom den kommande fem- till tioårsperioden. Fysikalisk kemi som bryggdisciplin mot fysik kommer att spela en allt större roll inte minst i utveckling av nanotekniken. Studiet av enskilda molekyler kommer att öka och ge en fördjupad bild av molekylära processer i såväl biologiska system som inom nanovetenskapen. Ett annat fält under utveckling är studiet av molekylär samverkan i mångkomponentsystem. Här finns både biologiska, tekniska och miljörelevanta tillämpningar. Användandet av stora forskningsanläggningar kommer att öka i betydelse. Detta gäller frielektronlaser, synkrotronljus och neutronkällor.

### Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Analytisk och fysikalisk kemi står sig relativt starka både internationellt och inom landet. Det finns en risk att speciellt analytisk kemi blir ett stödämne för andra snabbt växande discipliner främst inom medicin och att detta kan utarma den inomvetenskapliga tillväxten. Här har Vetenskapsrådet en mycket viktig funktion att fylla genom att ge en stabil ekonomisk bas för ämnesdjup så att andra mer tillämpningsdrivna forskningsfinansiärer fortsatt kan dra nytta av den höga ämneskompetensen inom analytisk och fysikalisk kemi.

### Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Mycket av forskningen inom analytisk och fysikalisk kemi är beroende av avancerad, men lokalt baserad utrustning. Typiska anskaffningskostnader för denna kategori av instrument, NMR-spektrometrar, masspektrometrar, lasersystem, konfokalmikroskop, fluorescensmikroskop och mer därtill, är i området en halv till tio miljoner kronor. Idag finns få forskningsfinansiärer som seriöst beaktar ansökningar om stöd till denna kategori av utrustning och budskapet till landets universitetsledningar är att de själva skall hantera denna finansiering. När så inte sker utarmas denna del av Svensk forskning relativt omgående. Kommer man inte snart fram till en nationellt fungerande policy för att tillfredsställa detta mycket legitima behov kommer det att ske en klar kvalitetssänkning av forskningen inom ämnena. Man ser redan en tendens att forskare söker sig mot användning av stora forskningsanläggningar där god utrustning är tillgänglig trots att vetenskapliga överväganden talar för att mindre storskalig utrustning är mer adekvat för att lösa de aktuella vetenskapliga problemen. Analytisk kemi är idag endast i ringa utsträckning beroende av större forskningsanläggningar. Det är vidare för tidigt att säga i vad utsträckning en etablering av ESS i Sverige kommer att stimulera till en analytisk kemisk forskning baserad på användande av neutroner. Som framhållits ovan finns inom området ett akut behov av lokalt baserad tyngre utrustning.

Fysikalisk kemisk forskning försiggår idag i betydande utsträckning vid stora forskningsanläggningar. Synkrotronljuskällor i Grenoble (ESRF), Zürich (PSI), Oxford (Diamond), Trieste (ELLETRA) och Lund (MAX II) tjänar alla som bas för olika typer av experiment inom fysikalisk kemi, både vad gäller ytspektroskopi och lågvinkelspridning/diffraktion. Motsvarande gäller för en rad neutronkällor där försök görs med både lågvinkelspridning och neutronreflektivitet i Grenoble (ILL), Oxford (ISIS) och Washington DC (NIST). Flera forskargrupper förbereder försök vid frielektronlasern i Hamburg. Vidare tar forskare inom fysikalisk kemi en aktiv roll i planeringen av MAX IV och ESS i Lund så att dessa kan ge optimala villkor för den planerade forskningen. Det är dock viktigt att inse att lösningen av en majoritet av forskningsproblem inom

fysikalisk kemi kräver användandet av ett flertal metoder. Optimalt utnyttjande av storskaliga forskningsanläggningar förutsätter tillgång till lokalt baserad utrustning lämpad för kompletterande studier.

## Oorganisk kemi

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Den oorganiska kemins kärna är att nå en grundläggande förståelse av reaktioner samt struktur och bindning i oorganiska, metallorganiska och bio-oorganiska ämnen och material, och tillämpning av dessa kunskaper inom olika användningsområden. Forskningen inom oorganisk kemi spelar en nyckelroll för t.ex. katalys, energiomvandling och energilagring, ren och effektiv processteknologi, sensorer, korrosion, metallproteiner, farmakologi, medicinska implantat, biologiska processer, elektronik, informations- och kommunikationsteknologi samt nanoteknologi.

Försök till gränsdragningar blir med nödvändighet något missvisande men man kan grovt särskilja syntes av nya material och föreningar kontra mätningar och teoretisk kemi. En annan möjlig skiljelinje är fasta tillståndets kemi kontra lösningskemi, där den förstnämnda ofta inneburit studier av rent oorganiska faser framställda vid hög temperatur och med material- och heterogenkatalysinriktning, medan det andra varit molekylärt inriktat med koordinationskemi i fokus och tillämpningar inom homogen katalys, metallorganisk och bio-oorganisk kemi.

Oorganiska processer på ytor hör också till ämnet, oavsett om dessa ytor tillhör naturliga mineral eller syntetiska material. Syntes och kontroll av ytskikt på atomär och molekylär nivå bör också nämnas. Relaterat till detta förekommer alla former av elektronmikroskopi.

Kristallografi, inbegripet analys och förståelse av kristallina faser, har historiskt varit en styrka hos svensk oorganisk kemi, (proteinkristallografi betraktas här som ett eget område, dock med naturliga beröringspunkter) även om ämnet internationellt sätt ibland klassas under fysikalisk kemi. Det verkar rimligt att fortsatt hänföra området till oorganisk kemi, framför allt det som på engelska nu benämns ”crystal engineering”, kristallteknik, och som har starka kopplingar till nano- och supramolekylär kemi, även om de studerade faserna endast innehåller organiska molekyler. (Undantaget strukturundersökningar, som endast syftar till att fastställa molekylstrukturen för en organisk substans.)

### Styrkor och svagheter

På grund av bredden och den ämnesöverskridande karaktären av tillämpningarna befinner sig många forskare med ena foten i oorganisk kemi och den andra i något annat ämnesområde och det är inte självklart att man identifieras sig som oorganisk kemist. Detta är inte problem *per se*, eftersom de tongivande seniora forskarna ofta besitter mycket goda kunskaper i oorganisk kemi från sin grund- och forskarutbildning. Det riskerar dock att bli ett problem om ämnet anonymiseras i utbildningsstrukturen och dagens doktorander företrädesvis väljer forskarutbildningskurser inom sina respektive tillämpningar och instrumentell teknik. En tvärvetenskapligt och gränsöverskridande organisation kan däremot vara en stor fördel, så länge man håller detta i minnet och ser till att grundkunskaperna förs vidare.

Denna risk kan kanske i viss mån mildras av den oorganiska sektionen inom Svenska kemistsamfundet, vars bildande var en direkt konsekvens av den internationella utvärdering av oorganisk kemi som Vetenskapsrådet gjorde 2008. Förutom konferenser och symposier är gemensamma doktorandkurser över landet något som kan säkerställa både kunskapsöverföring och kollegial samverkan.

En annan risk är en större specialisering som innebär att syntesverksamhet skiljs från mätningar och tillämpningar. Det finns en oro för att metodik, teknik och de speciella intellektuella utmaningar som syntesverksamhet inriktad på nya material och molekyler innebär inte värdesätts på rätt sätt utan betraktas som serviceverksamhet. I förlängningen riskerar man då inte bara att tappa kompetens och bli beroende av utländska samarbeten och kemikalieleverantörer, utan också att tappa förmågan att bedöma rimligheten i priser, tidsåtgång och verklighetsförankring när nya föreningar och material diskuteras.



Avseende de olika underdisciplinerna är slutsatsen att det fasta tillståndets oorganiska kemi med inriktning mot materialsyntes, inklusive komplexa ytor, och karakterisering av struktur-egenskapssamband står fortsatt stark med många skickliga grupper i landet. Den klassiska koordinationskemin har breddat sig till kristallteknik och koordinationspolymerer och står därmed närmare både det fasta tillståndets och nano- och supramolekylär kemi än tidigare. Den lösningskemiska varianten av koordinationskemi som en gång var svensk oorganisk kemis flaggskepp för en mer anonym tillvaro, men man publicerar fortfarande välciterade artiklar. Man bör notera en liten och processinriktad verksamhet inom denna underdisciplin inriktad på extraktion och metallåtervinning av potentiell betydelse för energi, material och gruvnäring. Diffraktion och elektronmikroskopi står fortsatt starka som metoder.

Den metallorganiska kemin har fortsatt många internationellt framstående företrädare, främst vid avdelningar dedikerade till organisk kemi. Man kan dock notera en betydligt större öppenhet på båda sidor av detta klassiska skrank. Den bio-oorganiska kemin har få företrädare men dessa håller hög standard. Oorganisk eller koordinationskemisk fotokemi har också ett antal internationellt välrenommerade representanter i Sverige, främst dock inom ramen för fysikalisk eller organisk kemi.

Viss oro finns på sina håll för den akademiska återväxten inom området, men man kan också notera ett antal lyckade rekryteringar på forskarassistentnivå.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Det bör understrykas att oorganisk kemi inte är en färdig vetenskapsgren i den meningen att det är svårt att hitta intellektuellt utmanade forskningsproblem och att huvudproblemet inte är kunskapsöverföring till mer tillämpade områden. Viss teori är starkt utvecklad, men givet de 80-tal grundämnen som finns i någorlunda rikligt förråd, deras olika möjliga oxidationstal (ett dessutom inte helt oproblematiskt begrepp) är både syntes av nya typer av föreningar och studier av deras egenskaper något man endast sett början på. Sannolikt har endast en bråkdel av de möjliga heterogena A–B-syntetiserats eller undersökts närmare

Man kan dock inte komma ifrån att dagens forskning är starkt tillämpningsdriven och det är i relation till detta man ska se uppräknings nedan.

En stark trend inom dagens kemi är s.k. grön kemi, och där har den oorganiska kemin en viktig roll inom både homogen (baserad på metallorganisk kemi) och heterogen katalys (baserad på fasta tillståndets oorganiska kemi) men också inom materialkemi där ersättning och återvinning av strategiskt viktiga och sällsynta grundämnen även fått medial och politisk uppmärksamhet. Relaterat till detta finns en gruvnäring som på många håll i världen behöver bli miljövänligare, ett område där lösningskemi är viktigt både i ren vätskefas och på ytor.

Inom det förstnämnda området är vi starka framför allt på den organiska sidan. Potentialen för en god utveckling är stor om man dessutom lyckas rekrytera gränsöverskridande nya förmågor med fokus på den oorganiska sidan. Inom fastfaskatalys ses också en motsvarande breddning mot organisk kemi.

Oorganisk fotokemi med inriktning mot artificiell fotosyntes och omvandling av solenergi till kemisk eller elektrisk form är ett internationellt sett mycket viktigt område och kommer så att förbli inom överskådlig framtid som en följd av de viktiga praktiska tillämpningarna. Vi har framstående forskare på avdelningar för fysikalisk och organisk kemi men måste också se till att de oorganiska aspekterna inte kommer bort. Speciellt i ljuset av att det på senare tid dykt upp nya intressanta ämnesklasser, t.ex. de s.k. perovskitmaterialen.

Relaterat till flera av de ovanstående områdena är den bio-oorganiska kemin, där en del av intresset också handlar om fotokemi eller katalys men även om utvecklandet av nya potentiella läkemedel. Studier av metallinnehållande proteiner är ofta oerhört komplexa och avancerar med hjälp av många olika sofistikerade spektroskopiska metoder då diffraktionsundersökningar inte alltid ger hela svaret på varken struktur eller verksamhetsmekanism. Modellområdet å andra sidan, vilket är tyngdpunkten för verksamheten i Sverige, kräver interdisciplinär organisk-oorganisk-biokemisk-teoretisk expertis. Detta bara är ett av de områden där småmolekylsyntes är fortsatt viktigt. De intellektuella och kunskapsbyggande utmaningarna är fortsatt stora inom all syntesverksamhet.

Oorganiska faser, metalliska eller icke-metalliska och tunnfilmstrukturerna kommer att vara fortsatt viktiga, framför allt med sikte på energiomvandling och energilagring. Typiska tillämpningar är batterier, bränsleceller,

solceller, termoelektriska material, protonledande material etc. Förutom syntes och strukturell karakterisering, som kan vara nog så komplexa, är de resulterande struktur-egenskapssambanden icke-triviala och för många tillämpningsområden är teoribildningen inte komplett.

I detta sammanhang kan det slutligen passa bra att påpeka att den teoretiska oorganiska kemien, framför allt baserad på kvantkemi i dess olika skepnader, också gör stora framsteg och är ett viktigt område för framtiden, både för periodiska strukturer (kristaller) och för enskilda molekyler och reaktionsmekanismer.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Svensk oorganisk kemi är aktiv och framgångsrik inom alla detta vittfamnande ämnes under- och gränsområden. Ämnet har en stark ställning internationellt vilket i Sverige speglas av att det är representerat inom många olika ämnesområden, avdelningar och institutioner. Det finns dock orosmoln på horisonten, framför allt på grund av att tillämpningar konkurrerar ut grundläggande kunskapsbyggande forskning och att ämnet på många lärosäten tappat synlighet både på grundutbildnings- och forskarutbildningsnivå, samt att det även ofta saknas tydliga administrativa signaler om ämnets existens. Från ett internationellt perspektiv är det värt att notera att verksamhet som i Sverige ofta klassificeras som t.ex. organisk eller fysikalisk kemi utomlands ofta bedrivs under benämningen oorganisk kemi.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

I dagsläget tycks tillgång till instrument och analysutrustning som god på det flesta ställen, men man oroar sig generellt för den nära framtiden. Många, dock inte alla, forskare uttrycker frustration över hur det egna lärosätet hanterat det ansvar dessa fått efter det att Vetenskapsrådet fått en annorlunda roll när det gäller vetenskaplig utrustning. Vissa laboratorier har redan svårt att återfinansiera uttjänta basinstrument och andra kan snart finna sig i samma situation. Detta är högst varierande från högskola till högskola men typiska problem är *state-of-the-art* enkristalldifraktometrar, elektronmikroskop och syntesutrustning.

Vad beträffar stora nationella och internationella anläggningar så kan ESS bli en viktig tillgång, men det finns också oro för att den kommer att dränera övrig verksamhet på resurser. MAX-lab används av en del grupper men har övergetts av andra, framförallt de som är inriktade mot enkristalldifraktometri på oorganiska material. Det finns förhoppningar om fler grupper ska få upp ögonen för neutronkällan ISIS i Storbritannien och en speciell svensk neutronspridningsgrupp arbetar för detta.

Skulle man hamna i ett läge där nyblivna doktorer och forskarassistenter blir beroende av att stanna kvar på sitt " eget " lärosäte eftersom det endast där gjorts de nödvändiga investeringarna för att verksamheten ska kunna bedrivas, hindrar man den för ämnets vitalitet viktiga förnyelsen och forskarutbytet. Saknas instrumentering som i ett internationellt perspektiv upplevs som "standardutrustning" försvåras också internationell rekrytering.

## Organisk kemi

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Organisk kemi innefattar studiet av organiska, d.v.s. kolinnehållande, föreningar, deras framställning och isolering, studier av deras struktur och egenskaper samt interaktioner med olika ämnen. Forskning inom organisk kemi har tillämpningar inom vitt skilda områden och utgör en viktig del av läkemedelskemi, medicin, bioteknologi och polymerkemi, liksom av vissa delar inom material- och energiforskningen.

Organisk syntes och katalys utgör en dominerande verksamhet och innefattar såväl grundläggande inomvetenskapliga studier, vilka syftar till utveckling av ny syntesmetodik, som framställning av föreningar med specifika egenskaper. Ny syntesmetodik utnyttjas för framställning av komplexa strukturer som imiterar naturligt förekommande föreningar eller utgör helt nya strukturer – dessa utnyttjas sedan för tillämpningar inom olika områden.

Studier av naturligt förekommande föreningar utgör en viktig del av den organiska kemien. Sådana föreningar är användbara i olika tillämpningar – så har exempelvis viktiga läkemedel kunnat identifieras – men

naturproduktstudier kan också syfta till studier av växelverkan mellan organismer och celler samt kartläggning av biologiskt släktskap.

Idag är det möjligt att studera många livsprocesser på molekylär nivå. Organisk kemi utgör ett viktigt verktyg när det gäller att få en insikt i komplicerade reaktionsförlopp och att studera molekylära interaktioner i levande system, med avsikt att förstå uppkomst av sjukdomstillstånd och att finna botemedel.

Kunskap om fundamentala fysikaliska processer och fenomen, som kemisk bindning, molekylära interaktioner och samband mellan struktur och reaktivitet, är viktig för den organiska kemin. Insikter i reaktionsmekanismer är en förutsättning för utveckling av kemisk syntes och för förståelse för biologiska processer. I detta sammanhang är teoretiska metoder ett viktigt hjälpmedel som utnyttjas både för att förutse och att förklara kemiska strukturer och förlopp.

## Styrkor och svagheter

Organisk kemi är en förutsättning för utveckling av bland annat bioteknologi, miljöteknik, ekologi, nanoteknologi och materialvetenskap. Det faktum att organisk kemi, framför allt synteskemi, används för att lösa problem inom andra områden har dock medfört att organisk syntes ibland betraktas som ett hjälpmedel för andra vetenskaper. Detta är en i många avseenden olycklig omständighet, som kan verka hämmande på den rent inomvetenskapliga utvecklingen av ämnet, och även kan medföra att den fördjupade kunskapen och förståelsen minskar, vilket i sin tur reducerar möjligheterna till konkurrenskraftig forskning.

De flesta forskargrupper i landet är relativt små och har därför svårt att ta sig an mer omfattande utmaningar. Större miljöer med fokus på problemställningar inom områden med anknytning till medicin, hälsa, miljö och energi behövs, där organisk-kemisk expertis kan bidra till att lösa framtidens stora utmaningar.

Intresset för ämnet kemi, och därmed för organisk kemi, bland unga har under en rad av år varit i avtagande. Alltför få av de bästa studenterna väljer avancerade kurser i organisk kemi. Detta medför problem för återväxten, framför allt svårighet att rekrytera doktorander och på sikt även unga forskare. Internationell rekrytering försvåras av en allt svårare finansieringssituation.

En omfattande omstrukturering av läkemedelsbranschen, som gör att en stor del av den industriella organiska kemin flyttas från landet, pågår. Detta medför att antalet arbetstillfällen minskar. Endast i viss utsträckning kompenseras denna minskning genom etablerandet av nya mindre kemi- och bioteknikföretag. Inom universiteten försvåras rekrytering av unga forskare på grund av avsaknaden av tydliga karriärvägar, samtidigt som de framgångsrika unga forskare som erhåller stöd från Vetenskapsrådet kan ha svårt att finna långsiktig försörjning inom universiteten.

Forskning inom området hållbar kemi, innefattande utveckling av t.ex. alternativa bränslen och utnyttjande av förnybara råvaror, är relativt svagt representerad i Sverige.

Totalsyntes av komplexa biologiskt aktiva föreningar är en verksamhet som kräver stora resurser och som, trots dess stora betydelse för framför allt läkemedelsindustrin, blir allt svårare att finansiera, inte bara i Sverige utan även internationellt.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Inom den organisk kemiska forskningen är syntes och katalys dominerande verksamheter, vars betydelse ökar i och med nya tillämpningar inom olika områden. Katalytiska processer med metallinnehållande föreningar som katalysatorer (metallkatalys) kompletteras eller ersätts idag ofta av processer som använder små organiska föreningar (organkatalys) eller biomolekyler (enzymkatalys eller biokatalys) som katalysatorer. De senare karakteriseras av hög substratspecificitet, varför mer generell användning i organisk syntes kräver design och syntes av modifierade enzymer, något som organiska kemister idag är involverade i.

Omfattande metodutveckling äger rum inom organisk syntes. Enkla metoder där komplexitet uppnås i få reaktionssteg eftersträvas; kaskadreaktioner, i motsats till flerstegsprocesser som kräver isolering och upprening av intermediärer, utgör en viktig del. Aktivering av ”inaktiva” substrat, i syfte att förbättra och effektivisera syntesprocesser genom att minska antalet reaktionssteg och därmed mängden biprodukter, är en annan tendens.

Allt större vikt läggs vid miljömässigt fördelaktiga metoder, så kallad grön kemi. Nya tekniker, som kemisk syntes i flöden, finner ökande användning, i synnerhet inom industrin.

En konsekvens av att biologiska processer i allt ökande utsträckning kartläggs på molekylär nivå är att organiska kemister är allt mer involverade i problemställningar inom livsvetenskaperna. Kemisk biologi ger nya kemiska insikter i biologiska företeelser och har lett till design och syntes av substanser med medicinska tillämpningar, t.ex. mot bakteriell resistens eller virus.

Framställning av material med specifika egenskaper, däribland nanostrukturerade material, är en verksamhet som ökar i betydelse och vars tillämpningar återfinns inom en rad olika områden.

Supramolekylär kemi är ett område i stark utveckling. Det är ett område som förväntas öka i betydelse och som i framtiden torde få betydande konsekvenser för tillämpningar inom molekylär mekanik och molekylär elektronik, liksom inom organisk syntes, katalys och polymerkemi. Design och syntes av självorganiserande och självreplikerande molekyler har många potentiella tillämpningar och kan bidra till insikter i mekanismerna för livets uppkomst.

Betydelsen av organisk kemi för energiforskning är ett relativt nytt fenomen. Design och syntes av molekyler för energiomvandling/lagring/transport är exempel på områden där organisk kemi spelar en nyckelroll. Spjälkning av vatten för produktion av vätgas och artificiell fotosyntes, med solen som energikälla, representerar forskning i ett gränsområde till fysiken, men inspiration hämtad från naturen förutsätter här också samarbete med biokemister.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Möjligheten att formge och framställa helt nya molekyler och molekylära system är utmärkande för den organiska kemien och är en förklaring till ämnets unika betydelse även för andra vetenskaper.

Svensk organisk kemi har en mycket stark ställning såväl ur ett nationellt som ur ett internationellt perspektiv. Forskning i internationella frontlinjen bedrivs inom flera områden och många forskargrupper är involverade i fruktbara internationella samarbeten. Organisk syntes/katalys och bioorganisk kemi/läkemedelskemi är dominerande, men andra, nyare områden ökar i omfattning. Organisk syntes utgör en viktig del även av många verksamheter där problemställningarna är hämtade från olika tillämpningar och där målet för forskningen ligger utanför den egentliga syntesverksamheten.

Inriktning mot organisk syntes omfattar både inomvetenskaplig metodutveckling och framställning av föreningar eller system med specifika egenskaper. Metallkatalys, ofta med koppling till koordinationskemiska studier, organkatalys och biokatalys är verksamheter där målet främst är att åstadkomma selektiva, i synnerhet enantioselektiva, syntesmetoder. Gröna metoder, speciellt för miljövänlig processkemi, uppmärksammas i ökande utsträckning. Biologiska metoder för syntes är kopplade till miljövänlig kemikalieproduktion, inte bara av enkla organiska föreningar av typen baskemikalier. Totalsyntes av komplexa biologiskt aktiva föreningar förekommer mer sparsamt i Sverige på grund av brist på nödvändiga resurser.

Bioorganisk kemi, innefattande studier av peptider, nukleinsyror, kolhydrater och andra naturprodukter, är ett annat viktigt område, såväl i Sverige som internationellt. Studiet av organiska föreningars roll i biologiska system syftar bl.a. till att förstå interaktioner mellan biomolekyler, som kolhydrater, proteiner och lipider, och att efterlikna, liksom även att öka förståelsen av, naturliga receptorer, d.v.s. molekylär igenkänning i biologiska system. Kunskapen kan sedan användas för framställning av diagnostika och läkemedel, för terapi, vacciner, inhibitorer etc. Organiska kemister har här en viktig roll i större samarbeten.

Artificiell fotosyntes är ett viktigt område i landet där organiska kemister framgångsrikt samarbetar med främst fysikaliska kemister och biokemister.

Supramolekylär kemi, där komplexa system uppnås genom självorganisation, är ett område som internationellt genomgått en omfattande utveckling. I Sverige finns forskargrupper med betydande aktivitet inom området. Nanostrukturerade organiska material förväntas få ökad betydelse, och ett ökande intresse för utveckling av nya metoder för framställning och studier av sådana material finns inom landet.

Tämligen få forskargrupper i landet är verksamma inom fysikalisk organisk kemi. Å andra sidan är många involverade i studier av reaktionsmekanismer, ofta med inslag av teoretiska beräkningar, liksom andra

grundläggande aspekter som studier av kemisk bindning, t.ex. i syfte att förstå intermolekylära interaktioner i biologiska system, och samband mellan strukturer och reaktivitet hos organiska föreningar.

Polymerkemi är ett internationellt viktigt område som även i Sverige har en stark ställning, men där organiska kemister inte är verksamma i någon högre utsträckning.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

### Spektrometrar och kromatografer

Idag har akademiskt verksamma organiska kemister god tillgång till nödvändig dyr utrustning som NMR- och masspektrometrar. En viss oro för framtiden finns i och med att universiteten övertagit ansvaret för finansieringen, och deras prioriteringar inte alltid överensstämmer med de som gjordes av de tidigare finansiärerna; riktlinjerna som tillämpas för finansiering kan också skilja sig mellan de olika universiteten. Alltmer sofistikerade programvaror ger möjlighet till avancerade experiment. Detta medför att särskilt utbildad personal ofta krävs för att sköta instrumenten, något som tillsammans med höga underhållskostnader utgör ett ökande problem.

Behovet av kromatografisystem (HPLC, GC) kopplade till olika detektorer samt andra typer av medeldyr utrustning (spektrometrar, polarimetrar etc.) är stort. Finansiering av sådan utrustning kan utgöra ett problem då medel normalt kan erhållas endast inom ramen för projektbidrag från externa finansiärer.

### Screening

Screeningbaserade strategier för att ta fram forskningsverktyg och startpunkter för läkemedelsutveckling ökade tidigare i betydelse, men torde bli av mindre vikt med anledning av minskande samarbeten med läkemedelsindustrin. En viss tillgång till infrastruktur för screening krävs dock inom den bioorganiska kemin.

### Databaser

Alla organiska kemister vid läroanstalter i Sverige har tillgång till sökmotorer och databassystem.

### Laboratorier

Laboratorierna vid de svenska universiteten är överlag i modernt skick. De slits dock kraftigt och behöver underhållas för att uppfylla lagstiftnings- och miljökrav. Säkerhetsaspekter och regler för kemikalieförvaring och -hantering har blivit ett alltmer krävande område och det kan behövas investeringar i moderna system för detta.

### Stora anläggningar

Synkrotronstrålning har fått betydelse för organisk kemi genom att stora biomolekylers struktur har kunnat bestämmas och ligga till grund för design av små molekylära system av betydelse för forskning inom biokemi, biomedicin och läkemedel. I framtiden kan man förvänta sig att MAX IV i viss utsträckning kommer att utnyttjas av organiska kemister, medan utnyttjandet av ESS framstår som mer tveksamt.

## Teoretisk kemi

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Den teoretiska kemin skiljer sig från andra traditionella ämnen inom kemin genom att den är metodologiskt definierad: den som forskar inom kemi enbart med penna och papper och datorer utan att använda experimentella metoder blir av hävd betraktad som teoretisk kemist. Basen för teoretisk kemi finns i de

fysikaliska grundlagar som för kemiska problem numera är väl etablerade. Teoretiska kemister (och det snarlika begreppet beräkningskemister) utvecklar och använder sig av en mångfacetterad samling metoder och modeller för att generera kemisk kunskap om molekylers och kondenserade fasers elektronstruktur, atomarrangemang, dynamik, bindningsförhållanden, stabilitet och reaktivitet, och sambanden dem emellan. På elektronisk och atomistisk nivå utgör kvantmekaniska elektronstrukturmetoder och statistisk-mekaniska simuleringar – såsom molekylodynamik(MD)-simuleringar och Monte Carlo(MC)-simuleringar – hörnstenarna.

Med kvantmekaniska beräkningar är det omöjligt att nå ens till måttligt storskaliga system eftersom dessa metoder är så datorkraftintensiva. Atomistiska växelverkansmodeller där elektronerna inte tas med explicit, s.k. kraftfält, utvecklas för att tillåta simuleringar med större system och längre tidsskalor. Kvaliteten på dessa kraftfält är kritisk. Strukturer och fenomen över ännu längre tid- och längdskalor kan studeras med s.k. mesoskopiska modeller och kontinuum-beräkningar. De flesta teoretiska kemister i Sverige arbetar med kvantmekaniska elektronstrukturberäkningar eller atomistiska och mesoskopiska statistisk-mekaniska simuleringar.

En annan hörnsten inom den teoretiska kemien är utvecklingen av metoder för att beräkna intressanta molekyl- eller materialegenskaper inom de kvantkemiska eller statistisk-mekaniska ramverken. En del analysmetoder kräver större fundamentala kunskaper än själva simuleringsmetodiken eftersom det krävs en nära koppling till experimenten som man vill efterlikna eller analysera. Verksamhet av detta slag pågår idag bland svenska teoretiska kemister.

## Styrkor och svagheter

### Styrkor

- Teoretisk kemi är välförankrat i Sverige med både bred verksamhet och spetskompetens. De flesta av de större lärosätena (dock inte alla) har en aktiv teoretisk-kemisk verksamhet. Tillämpningarna finns inom hela spektrumet av de traditionella kemiområdena biokemi, organisk och oorganisk kemi samt fysikalisk kemi liksom i mer ingenjörsnära områden.
- Svensk teoretisk kemi har ett gott renommé och håller hög kvalitet. Svenska forskare ligger väl till internationellt, deltar aktivt i internationella samarbeten och ligger inom flera områden i den internationella framkanten. Problemställningarna i fokus – både de tillämpade och metod- och modellutvecklingsarbetet – är väl valda också i ett internationellt perspektiv. Svenska forskare deltar i den internationella utvecklingen kring nya trender inom teoretisk kemi.
- Behovet av teoretisk-kemisk expertis kommer att öka allteftersom större noggrannhet, bättre metodik och ny kunskap krävs när utvecklingen går mot alltmer komplicerade molekyler, material, och gränssnitt med subtil kemisk funktionalitet och mot mer komplicerade kemiska processer med exempelvis energi-, miljö- och katalysrelevans. Med tillgång till alltmer *realistiska* simuleringar kommer intresset från experimenter, industri och samhälle att öka ytterligare. Vidare kommer *nya typer av experiment och infrastrukturer* att kräva nya slags simuleringar av egenskaper och fenomen för att assistera vid tolkningen av experimenten. Sverige har en god bas för att klara detta om de ekonomiska förutsättningarna tryggas.
- SNIC (The Swedish National Infrastructure for Computing) och dess hantering av högpresterande datorresurser i Sverige fungerar bra.

### Svagheter

- Resurserna inom svensk teoretisk kemi är underdimensionerade i förhållande till det ökande behovet av teoretisk-kemisk expertis och simuleringar, och det humankapital som finns tillgängligt. Fler forskargrupper behöver ges möjlighet att fokusera på metod- och modellutveckling samt validering. Sverige har en stor kompetensreserv som för närvarande skulle kunna klara den behövliga expansionen om ekonomiska resurser funnes. Riskerna som följer av att *inte* satsa vidare på dessa verksamheter är stora.

- Karriärvägarna är otydliga för unga forskare. Detta är ett generellt problem vid våra lärosäten. För teoretiker finns dessutom den extra svårigheten att metodutveckling och mjukvaruutveckling trots betydelsen för området inte nödvändigtvis leder till publikationer. Detta kan få de största konsekvenserna just för den grupp som kanske bäst behöver dem. Samtidigt kan denna typ av verksamhet inte utföras av andra än personer som ligger på topp inom sina områden, alltså aktiva forskare. Kort sagt: större ekonomiska resurser behövs för att driva utvecklingen framåt i en adekvat takt.
- Omfattningen av den grundläggande utbildningen inom kvantkemi, kemisk bindning och statistisk-mekaniska simuleringar är liten. Detta beror inte på brist på tillgängliga kurser i teoretisk kemi utan brist på studenter som väljer att läsa dem.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Ett område som förefaller ha gradvis minskat i omfattning i Sverige under åren är analytiska vätsketeorier, förmodligen i takt med att det blivit möjligt att göra mer detaljerade "datorexperiment". En del av den förståelse som ligger i de analytiska vätsketeorierna försvinner därmed. Det är önskvärt att en bra balans kan uppnås.

Vidare har traditionell vågfunktionsbaserad kvantkemisk metodutveckling minskat något i omfång. Detta är säkerligen en följd av att området har mognat och tillgodoser många tillämpares behov idag, speciellt vad gäller beräkningar för grundtillstånd. Det är önskvärt att Sverige bibehåller en god kompetens här och viktiga utvecklingsområden inom elektronstrukturteori är bland annat exciterade tillstånd och starkt korrelerade system. Det är värt att minnas, att flera kemiskt relevanta problem för molekyler och material kräver att man går bortom DFT-metoderna.

Nedan listas några områden som kan antas expandera (både vad gäller metod- och modellutveckling och tillämpning) under den närmaste tioårsperioden.

### Allt mer komplicerade strukturer och kemiska system

I problemval kommer det att finnas en strävan efter förståelse av allt mer komplicerade kemiska processer och allt mer komplicerade system, liksom kombinationer av system. Detta är av godo – så länge kvaliteten på tillgängliga metoder är tillräckligt hög för problemställningen i fråga. Den ultimata visionen är att kunna göra *in silico*-förutsägelser och *in silico*-design av komplicerade molekyler, vätskor och material med önskade egenskaper.

### Multiskalmodellering, kombination av metoder, QM/MM-metodik

Det långsiktiga målet för multiskalmodellering är en hierarkisk stegstruktur där man förmedlar information mellan modellerna för olika skalor, i princip hela vägen från elektroniska modeller upp till makroskopiska längdskalor och långa tider. QM/MM som är en hybridmetod där man inkorporerar kvantmekaniken (QM) in i ett reaktivt område av ett större molekylärt system som man simulerar med klassiska metoder och empiriska molekyl-mekaniska (MM) kraftfält är också en teknik under frammarsch.

### Utveckling av atomistiska kraftfält, "coarse-graining", approximativa QM-metoder

Att förenkla de elektroniska modellerna och göra atomistiska kraftfält, och att utveckla molekylära modeller genom att skapa en grovkornig (coarse-grained) bild av systemet är en annan stark trend.

### Dynamik och reaktivitet för snabba processer, kvantdynamik och icke-adiabatiska processer

#### *Ab initio* MD-simuleringar

Användningen av de mycket datorkrävande *ab initio*-MD simuleringarna som kombinerar dynamik och elektronstrukturberäkningar och kan studera t.ex. reaktiva system kommer att öka i omfattning.

Beräkning av egenskaper och jämförelse med experiment.

Utveckling av metodik och modeller för att beräkna (inte minst nya typer av) spektra och bilder och analysera bakomliggande egenskaper och fenomen.

Kunskapsbaserad modellering och datamining.

Teoretisk kemi har fått en gren som skapar och utnyttjar systematiskt samlad kunskap arkiverad i databaser för att finna intressanta samband. Bio- och kemo-informatik är två exempel på detta.. Screening av struktur- och andra databaser växer fram som en allt viktigare komponent inom flera områden efter att länge ha varit viktig inom läkemedelsforskning.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Modern svensk teoretisk kemi har utvecklats under fem decennier efter kvantkemins intåg i Sverige. Sverige har länge varit framstående i utvecklingen av kvantkemiska metoder, program och algoritmer för noggranna och effektiva elektronstrukturberäkningar. Några grupper i Sverige fortsätter att utveckla etablerade kvantmekaniska vågfunktionsbaserade metoder och programpaket. Andra utvecklar nya kvantkemiska metoder och tekniker, där speciellt approximativa ”tight-binding”-liknande icke-empiriska DFT-metoder och avancerade tekniker för molekylära egenskaper inom olika typer av spektroskopier och fotokemi bör nämnas. På 1980-talet började statistisk-mekaniska partikel-baserade molekylsimuleringar såsom molekylodynamik (MD), brownisk dynamik (BD) och Monte Carlo (MC) få ett allt större utrymme inom svensk teoretisk kemi, och har idag en stark position. Utvecklingen av en av de riktigt stora MD-koderna internationellt leds från Sverige. Kombinationer av flera metoder och modeller blir allt vanligare.

Sammanfattningsvis befinner sig den svenska teoretiska kemin i den internationella framkanten inom ett flertal delområden och svenska forskare deltar aktivt i internationella samarbeten. Problemställningarna som är i fokus – både de tillämpade och metod- och modellutvecklingsarbetet – är väl valda också i ett internationellt perspektiv. Svenska forskare deltar i den internationella utvecklingen kring nya trender inom teoretisk kemi.

Teoretiska kemin i Sverige idag är kompetensstark men inte resursstark. Karriärvägarna är få och trånga. Metodutveckling kräver en särskild insats i framtiden, och här kan avancerade forskningsbaserade applikationsexperter av den modell som de strategiska forskningsområdena i e-vetenskap valt vara en väg fram.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Koordineringen av forskningsresurser för beräkningskemi sköts av SNIC (The Swedish National Infrastructure for Computing). Teoretisk kemi i Sverige är väl betjänt av denna mycket kostnadseffektiva infrastruktur för krävande beräkningar. Resursfördelningen hanteras professionellt och effektivt av SNAC (Swedish National Allocations Committee).

Behoven av forskningsinfrastruktur för teoretisk kemi i ett 5–10-års perspektiv är framför allt följande:

- Det som främst behövs ökas inom teoretisk kemi-området är just beräkningsresurserna, HPC. Dessa behöver ökas c:a 50–100 ggr under de närmaste 5–10 åren för att de beräkningstunga delarna av teoretisk kemi ska vara internationellt konkurrenskraftiga.
- En fortsatt satsning på avancerade forskningsbaserade applikationsexperter.
- Det finns ett behov av stöd för att migrera mjukvara till nya datorarkitekturer.
- För de enskilda applikationerna inom teoretisk kemi kan också flera av de andra stora infrastrukturerna (t.ex. MAX-lab) naturligtvis vara relevanta, speciellt som en del av samarbetsprojekt.



## Övergripande områdesbeskrivning

Kemiteknik utgör den teknologiska basen för processindustrin i vid bemärkelse och innefattar branscher som kemi, bioteknik, läkemedel, livsmedel, massa och papper samt metalliska och polymera material. Ämnet är relativt ungt och mycket av de grundläggande principerna formulerades för lite mer än 100 år sedan, med en stark expansion under uppbyggnaden av petrokemisk industri på 1950- och 1960-talet. Centrala begrepp är enhetsoperationer (och enhetsprocesser), samt reaktionsteknik, där kemiska reaktioner kopplas till värme- och massöverföringsprocesser i utformning av kemiska reaktorer. Enhetsoperationer är t.ex. värmeväxling, destillation och filtrering för att nämna några exempel. En produktionsprocess inkluderar såväl reaktorer som flera olika enhetsoperationer som samverkar med varandra. En viktig del inom kemiteknik är processdesign i vilket helheten i en produktionsprocess analyseras. Målet är att optimera en process för att uppnå ett effektivt resursutnyttjande avseende framförallt energi och råvara. Denna optimering är också relaterad till processekonomi genom en ökad processintegrering och processintensifiering.

I SCBs klassificering av industri skiljs skogsindustri från kemisk industri, men grundläggande kemitekniska frågeställningar finns i bägge branscherna. Skogsindustrin sysselsatte runt 60 000 personer, medan kemisk industri sysselsatte runt 34 000 år 2012. Det årliga exportvärdet låg på runt 123 miljarder kronor och 100 miljarder kronor för respektive bransch. Detta utgör en mycket betydande andel av Sveriges totala export, vilket understryker vikten av en stark forskning och utveckling i fältet.

Ämnesområdet cellulos-, pappers- och fiberteknik innefattar traditionellt de processer och produkter som massa och pappersindustrin producerar. En stor del av forskningen inom ämnesområdet de senaste 20–30 åren har varit fokuserad på ett bättre råvaruutnyttjande med bibehållna eller förbättrade produkttegenskaper med minskad påverkan på miljön. Sammantaget har forskningsresultaten lett till att massa- och pappersindustrin inte bara är en leverantör av fiber utan att den också är en stor nettoexportör av el- och värmeenergi samt energiråvara. På senare år har forskning och utveckling av andra alternativa och komplementära produkter baserade på biomassa ökat eftersom massa- och pappersindustrin står inför en ökande konkurrens från länder, framförallt i Asien och Sydamerika, med lägre råvaru- och produktionskostnader. Det är därför naturligt att inkludera en bredare användning av biomassa i en ämnesmässig beskrivning.

Svensk kemisk processteknik och livsmedelsteknik står idag inför en stor omställning främst driven av kraven på hållbara och miljömässiga produktionssystem men även som en följd av utvecklingen av ny teknik inom respektive område. Forskningen inom kemisk processteknik måste i framtiden kunna möta produkt- och processutveckling på flera olika skalnivåer från bulkprocesser till molekylära processer. Detta ökar kraven på både bredare och mer ämnesöverskridande kompetenser inom både modellutveckling och experimentell teknik. I stället för att varje företag utvecklar dyrbara processer baserat på företagets tidigare erfarenheter med svag teoretisk grund bör man satsa på processteknisk grundforskning och ta fram den grundläggande förståelse och de generella verktyg som behövs för att utveckla nya komplexa processer.

Svensk forskning inom området innefattar ett brett spektrum av aktiviteter och kan i ett internationellt perspektiv betraktas som medelstark till stark. Forskningen är dock idag fokuserad till ett fåtal forskargrupper, vilket gör att det saknas större starka miljöer med stor bredd och nödvändig infrastruktur för att kunna möta dagens och framtidens behov av flexibla och komplexa kemiska processer på olika skalnivåer. Inom svensk forskning finns generellt en svaghet i kopplingen emellan forskning riktad mot att ta fram nya modellverktyg och verifieringen av modellerna mot experimentella data. De stora satsningarna på forskning inom exempelvis bioraffinering och bioteknologi öppnar upp för stora möjligheter till utveckling av nya innovativa produktionsprocesser inom livsmedelsteknik och produktion av kemikalier.

De senaste årens ökade nyrekrytering av unga forskare inom området kemiteknik har i viss mån förbättrat återväxten av kompetens inom området, men med hänsyn till det stora antalet pensionsavgångar under de närmaste fem till sju åren så behövs större insatser. Hela det kemitekniska området, vilket inkluderar kemisk process-, livsmedels-, cellulos- och fiberteknik, har alla behov av större nationella satsningar på infrastruktur.

# Processteknik för användning av biomassa – Cellulosa, papper och bioraffinaderier

## Beskrivning av forskningen inom ämnet

Forskningen kring användning av biomassa är bred och tvärvetenskaplig, med starka och ökande överlapp mot både materialforskning och bioteknisk forskning. Tyngdpunkten för denna ämnesbeskrivning är den kemitekniska grund som krävs för att *förstå de processer genom vilka biomassa omvandlas till den önskade produkten* (massa, papper, specialfiber, kemikalier m.m.). Eftersom slutproduktens egenskaper är så centrala, i synnerhet för nya fiberapplikationer, är det dock naturligt och nödvändigt att forskning kring materialegenskaper inkluderas.

Man kan schematiskt dela in forskningen i processer för makromolekyler (cellulosafibrer, hemicellulosa och lignin) samt processer för användning av biomassa för produktion av mindre molekyler (via termokemiska eller biotekniska processer). Traditionell cellulosa-, pappers- och fiberteknik har fokus på att omvandla vedmaterial till olika pappersprodukter baserade på vedfibern. Detta inkluderar ett flertal frågeställningar, exempelvis karakterisering av utgångsmaterialet (kemiskt och fysikaliskt), separation av fiberstrukturer, strömning av fibersuspensioner samt torknings- och separationsprocesser. Den pågående strukturomvandlingen inom pappersindustrin har lett till ett förstärkt forskningsfokus på nya produkter baserade på vedens huvudkomponenter cellulosa, hemicellulosa och lignin. Här kan nämnas processer där cellulosa från skogsråvara kan ersätta bomullsfibrer, och nya material som nano-cellulosa. Hemicellulosa kan extraheras i termokemiska processer under sura eller alkaliska förhållanden, och användas som barriärmaterial i förpackningar, och lignin kan t.ex. användas för kolfiberframställning. Precis som hemicellulosa påverkas ligninprodukten starkt av vilken process som används för fraktionering av biomassan, vilket styr både molekylviktfordelning och löslighet i olika lösningsmedel och därmed möjligheten att skapa produkter av högre värde. Utveckling av förgasningsteknik och katalytisk uppberedning av syntesgaser, men också en kombination av termokemiska och biokemiska/biotekniska processer för kemikalieproduktion baserat på den s.k. sockerplattformen, för kemikalieproduktion, är ett expanderande användningsområde för biomassa, eller utvalda fraktioner av biomassa.

## Styrkor och svagheter

Med tanke på skogsindustrins stora betydelse för Sverige är det inte förvånande att Sverige har en lång och framgångsrik forskningshistorik inom området. Det bedrivs forskning på ett antal av Sveriges lärosäten, såväl inom pappersteknik som framväxande nya tillämpningar inom materialvetenskap eller kemikalieproduktion. Forskningen sker vid Kungl. tekniska högskolan (KTH), Chalmers, Umeå universitet, Luleå tekniska universitet, Lunds universitet, Karlstads universitet och Mittuniversitetet, med lite olika profil vid de olika lärosätena. Det bedrivs också industrinära forskning vid institut, framförallt Innventia, som har en nära koppling till skogsindustrin. Även Sveriges tekniska forskningsinstitut (SP) har initierat satsningar på biomassaområdet, och bland annat tagit över 60 % av Processumklustret i Örnsköldsvik.

Under de senaste fem åren har flera storskaliga satsningar gjorts för att stärka forskningen rörande biomassaomvandling, t.ex. Wallenberg Wood Science Center, finansierat av Knut och Alice Wallenbergs stiftelse. Centret, som startade 2009, är ett samarbete mellan Chalmers och KTH. Forskning bedrivs inom flera fält, varav ett är nya material. Satsningen är avsevärd och centret ger goda förutsättningar för utveckling inom området. En satsning med ett annat fokus som kan nämnas är Bio4Energy. Detta är ett samarbete mellan Umeå universitet, Luleå tekniska universitet och Sveriges lantbruksuniversitet med tyngdpunkt på biomassaomvandling, med såväl förgasningsforskning som annan bioraffinaderiforskning. Detta är två exempel på nysatsningar som har skapat förutsättningar för etablerande av större forskningsmiljöer. En långsiktigt viktig och positiv effekt är att antalet forskarutbildade kommer att öka.

Storskaliga satsningar kan dock delvis ske till priset av minskade möjligheter för stöd till flera mindre direkt forskardrivna projekt, med en minskad diversitet som följd. En annan faktor att beakta är att universiteten i allt högre utsträckning saknar egna resurser att upprätthålla en ämnesmässig baskompetens och är numera beroende

av externa medel för detta. Detta gäller inte minst fundamental kemiteknik. Det finns naturligtvis också anledning till oro för den relativt svaga utvecklingen av delar av skogsindustrin som är verksam i Sverige, vilket kan leda till minskande FoU inom industrin. Risken finns att de högkvalificerade forskare som utbildas inte finner arbete i en vikande forskningsverksamhet inom skogsindustrin, och att nya företag som kunde assimilera kompetensen inte hunnit växa till sig.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Flera olika krafter påverkar området. För det första finns ett behov inom skogsindustrin att möta utmaningar i termer av växande konkurrens, och dessutom en vikande marknad för segmentet tryckpapper. Förpacknings- och hygienprodukter har fått en ökad betydelse, men ytterligare utveckling både av effektivare processer men framförallt nya produkter är viktig. Satsningar görs inte minst på nya material baserat på cellulosa, men också produkter baserade på hemicellulosa och lignin; nanocellulosa, kolfiber baserade på lignin, och förpackningsfilmer baserade på hemicellulosa.

Som exempel på satsningar i vår omvärld kan nämnas att den finska statliga finansören Tekes satsar på ett forskningsprogram kring nya produkter från cellulosa kallat Design driven value chains in the world of cellulose – framförallt inriktat mot tillämpningar inom textilindustrin. Detta är ett samarbete mellan VTT, Aalto-universitetet och Tammerfors universitet. Inom EU:s forskningsprogram Horizon 2020 kommer stora satsningar att göras på PPP (public-private-partnership). Förväntade satsningar är i storleksordningen 20 miljarder euro under 2014–2020. Europeiska skogsindustrier har formulerat en strategisk forskningsagenda, Strategic Research and Innovation Agenda for 2020, i vilken ICT (informations- och kommunikationsteknik), nanoteknik, avancerade material, bioteknik samt nya tillverkningsprocesser lyfts fram som nyckel teknologier för utvecklingen fram till 2030.

En andra drivkraft är vårt behov att hitta alternativ till olja som råvara för den kemiska industrin, och en minskad miljöpåverkan av kemisk industri. Den kemiska industrin i Europa har, liksom skogsindustrin, tappat i konkurrenskraft, framförallt gentemot Asien, vilket framhålls av bl.a. the European Technology Platform for Sustainable Chemistry. Vikten av reducerad energianvändning och minskade CO<sub>2</sub>-utsläpp bl.a. genom ökad biomassaanvändning är strategiska mål för SPIRE (Sustainable Process Industry through Resource and Energy Efficiency). Forskning mot "bioraffinaderier" inklusive processteknik för hantering av biomassa är ett växande fält. Det finns ett stort behov av integrering mellan kemiteknik och bioteknik i utformning av nya typer av bioraffinaderier, vilket understryks av en annan PPP, Bio-based Industries Initiative. Som nationellt exempel kan också nämnas initiativet Hållbar kemi 2030 drivet av Stenungsundsindustrierna. Det bör understrykas att miljö- och hållbarhetsanalyser på många olika plan (energieffektivitet, utsläpp av växthusgaser, påverkan på tillgänglig landareal, biodiversitet mm) är helt nödvändiga och måste ingå i denna forskning. Detta ställer krav på interdisciplinär samverkan av en betydligt större bredd än tidigare.

I USA och Kanada är trenderna liknande de i Skandinavien och Europa, nämligen ett ökat fokus på nya material från olika fraktioner av råvaran samt produktion av baskemikalier (antingen identiska med befintliga baskemikalier eller sådana med samma funktionalitet). Inte sällan innefattar processerna bioteknisk omvandling i ett eller flera steg efter en initial termokemisk fraktionering av råvaran, och dessa processer ses antingen som ett komplement till existerande produktion eller som fristående processer.

Sverige har en god tillgång till biomassa, en lång tradition av industriell användning av skogsråvara, samt en etablerad forskning inom området. Det finns därför utmärkta förutsättningar för att skogsindustrin i samarbete med den kemitekniska industrin och universitetsforskare ska kunna utveckla branschen från att huvudsakligen ha papper som slutprodukt till att även producera andra polymera material och kemikalier baserade på skogsråvara. En gemensam nämnare för nya processer baserade på biomassa är effektiv fraktionering av ingående biopolymerer. Här är en djupförståelse för biomassans struktur väsentlig, vilket kräver både en ökad interaktion med materialvetenskaperna och med de biologiska vetenskaperna.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Svensk forskning inom pappers- och cellulosaoområdet har ett gott internationellt renommé. Detta beror naturligtvis inte minst på vår stora skogsindustrisektor, som har inspirerat forskningsverksamhet vid våra universitet. Det har funnits en naturlig avnämning av både forskningsresultat och de utexaminerade forskarna. Den strukturomvandling av branschen som nu pågår, med både ändrad forskningsinriktning och forskningsorganisation, påverkar denna samverkan. Vad beträffar forskning kring tillämpningar av biomassa utanför skogsindustrin, finns svensk forskning med, men inte med riktigt samma ledande position. Det är viktigt att svensk forskning inte tappar position när det gäller ny teknik och ny användning av biomassa. I detta skede måste dessutom forskningen vid universitet troligen gå före industrin.

Betydande långsiktiga satsningar av grundläggande karaktär kommer därför vara nödvändiga för kunskapsgenombrott, som på sikt möjliggör nya användningsområden för biomassa inom såväl skogsindustri som annan kemisk industri.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Inom traditionell forskning för massa- och pappersteknik finns en väl utvecklad forskningsinfrastruktur i landet. Mycket av denna storskaliga (pilotskala) utrustning finns dock inom industrins FoU samt på forskningsinstitut. Avancerad materialkaraktärisering är som tidigare nämnts viktig, och får allt större betydelse. I termer av nationell infrastruktur kommer därför MAX IV-laboratoriet att bli en viktig resurs. Anpassning för tillämpningar mot biomassa är viktigt här. Framväxande forskning inom bioraffinaderiområdet har också behov av tillgång till materialet i sig – d.v.s. konditionerad och förbehandlad biomassa. Infrastruktur för att tillgodose detta behov är därför väsentlig.

Det största infrastrukturbehovet på universitet och högskolor är troligen finansiering av medeldyr utrustning (0.5–3 Mkr). Detta behov har ökat bl.a. på grund av ändrad finansieringspolicy från viktiga bidragsgivare gällande utrustning. Vikande finansiering av universitetens egna lokaler för experimentell verksamhet, inte minst apparthallar, skapar också behov av extern infrastrukturfinansiering.

## Kemisk processteknik och livsmedelsteknik

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Kemisk processteknik utgör den teknologiska basen för processindustrin i en vid bemärkelse, vilket innefattar ett flertal industriella branscher såsom kemi, bioteknik, läkemedel, livsmedel, massa och papper samt metalliska och polymera material. Industrin är starkt exportorienterad och mer än hälften av Sveriges nettoexport kommer från denna industri. Detta gör att det finns ett starkt omvärldsberoende där företagen ofta upplever stark konkurrens, men i många fall även samarbetar över nationsgränserna. Ämnet kemisk processteknik är även viktigt inom angränsande områden, som miljö- och energiteknik samt transport- och fordonsforskning.

Utmärkande för kemisk processteknik är kopplingen mellan kemiska reaktioner, strömning, mass- och värmetransport. Viktiga tillämpningar utgörs av reaktions-, separations- och blandningsprocesser där processerna ofta är flerfasprocesser med samtidig reaktion och transport över fasgränssytor. Den vetenskapliga och teknologiska basen utgörs av kemiteknik, vilket inkluderar ett antal olika discipliner, som t.ex. transportprocesser, termodynamik samt kemisk kinetik, med nära koppling till grundvetenskaperna fysikalisk kemi och fysik. Ämnet har en starkt experimentell såväl som teoretisk karaktär, där matematisk modellering på olika skalnivåer är av central betydelse för att beskriva, optimera samt dimensionera både utrustning och processer.

Förutom för produktionsnära FoU så är kemiteknisk forskning av central betydelse för att skapa ett bärkraftigt samhälle, och har ofta nära anknytning till miljö- och energirelaterad forskning.

## Styrkor och svagheter

Svensk forskning och utveckling inom kemisk processteknik och livsmedelsteknik innefattar ett brett spektrum av aktiviteter. Sveriges ställning, i ett internationellt perspektiv, är medelstark till stark. Till de starkare områdena hör transportprocesser/modellering, kristallisation, torkning, membranprocesser, tillämpad elektrokemi, termokemisk omvandling och katalys. Inom några forskargrupper i Sverige finns en lång och stark tradition av modellering med bland annat CFD (*Computational Fluid Dynamics*) och utnyttjande av avancerade mätmetoder, som exempelvis PIV (*Particle Image Velocimetry*), PLIF (*Planar Laser-Induced Fluorescence*), LDA (*Laser Doppler Anemometry*) och UVP (*Ultrasonic Velocity Profiling*).

Forskningen inom kemisk processteknik är idag fokuserad till ett fåtal forskargrupper, vilket gör att det saknas större starka miljöer med stor bredd och nödvändig infrastruktur för att kunna möta dagens och framtidens behov av flexibla och komplexa kemiska processer på olika skalnivåer. Det finns en generell svaghet i kopplingen mellan å ena sidan forskningen att ta fram nya modellverktyg och å andra sidan verifiering av modellerna mot experimentella data. Nya kombinerade modeller på olika skalnivåer av mer komplexa processer, ibland integrerade i existerande produktionsprocesser, ökar behovet av tester i större skala.

Industrin efterfrågar generellt mer ämnesöverskridande kompetenser, som t.ex. kunskaper i processteknik kombinerat med avancerade nya analytiska och beröringsfria mätmetoder, en typ av satsningar som ännu inte görs inom akademisk FoU.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Svensk kemisk processindustri och livsmedelsindustrin står inför stora processtekniska utmaningar som kräver en större beredskap för förändring och en förmåga att snabbt ta fram nya lösningar än vad som traditionellt har varit fallet. En stor utmaning är att integrera etablerad verksamhet, som ger intäkter, med forskning och utveckling av nya produktionsprocesser, vilka ligger till grund för framtida intäkter. En viktig fråga är: hur ska FoU-verksamheter inom akademien, institut och industri gemensamt möta denna utmaning?

Det finns ett antal tongivande trender inom området kemisk processteknik som uppkommit till följd av industrins behov och samhällets krav samt de ny landvinningar som sker inom FoU. Sammanfattningsvis kan dessa trender beskrivas enligt följande:

- Nyutvecklade och framtida industriella processer inom t.ex. de nya områdena bioraffinering, biobaserade drivmedel och biologiska produktionssystem drivs i både stor och mindre eller mycket mindre skala, jämfört med traditionella kemiska processer. Kraven ökar på energieffektiva system med färre antal processteg, med bibehållen eller förbättrad flexibilitet. Möjligheten att kombinera flera processer i färre steg genom s.k. processintensifiering ställer ökade krav både på förståelsen av komplexiteten i sammansatta dynamiska processsystem, samt på hur man använder ny processanalytisk teknologi (PAT). Det senare innefattar nya mättekniker för utformning, analys och styrning av processer on-line. Mätning i realtid kan reducera produktionstider, säkerställa produktkvalitet och möjliggöra flexibel produktion. Detta är framförallt viktigt vid användning av förnyelsebara råvaror där variationer i råvarans sammansättning kräver en snabbare och direkt styrning för att möta variationerna. Nya avancerade analytiska och s.k. beröringsfria mätmetoder är även viktiga för utvecklingen av ”traditionell” kemisk processteknik.
- Förnyelsebara råvaror kommer att få en allt större betydelse som bas för att ersätta fossil råvara vid produktion av material och kemikalier, men kommer även få en stor betydelse vid utvecklingen av nya funktionella material och substanser. I det senare fallet kommer bioteknologi och biologiska produktionssystem få en stor betydelse. FoU har så här långt generellt fokuserat på de biologiska processerna i laboratorieskala. De stora utmaningarna för en vidare utveckling till kostnadseffektiva kommersiella system ligger dock nedströms den biologiska processen inom processtekniska områden, såsom separation, avvattnings, torkning och extraktion. Här ingår även kemiska omvandlingsprocesser som baseras på helt nya råvaruplattformar. Viktigt inom området är att förstå kopplingen mellan processen och produktkvalitet. Inom processindustri, där man traditionellt varit och i många fall fortfarande är helt beroende av fossil råvara som olja för sin produktion av t.ex. kemikalier eller specialoljor, arbetar man idag i hög grad med att hitta nya lösningar med biomassa som bas för att ersätta oljan.

- Produktion av livsmedel går från ett s.k. ”push-system”, som drivs av producentens förmåga att generera varor, till ett ”pull-system”, som drivs av konsumenternas behov av mer hälsosamma, smakrika och bekväma produkter. Ekologisk produktion, och miljöfrågor, som exempelvis reduktion av avfall och energianvändning, kommer bli allt viktigare. Framtida framställning av livsmedelsprodukter kräver en ökad förståelse av samspelet mellan råvaran, processen och produkten, vilket innebär att man måste förstå och kontrollera de grundläggande mekanismerna för värme- och masstransport samt materialströmmar i livsmedelsprocessen. Kunskap om detta kan, i kombination med kvantifiering av kinetiken för kemiska, fysikaliska och mikrobiologiska förändringar i produkten skapade av processen, användas för att utforma en tillverkningsprocess för produktion av produkter med önskade egenskaper.
- Hållbara och miljömässiga produktionsprocesser har delvis genomförts i ett flertal branscher men kommer att få en än större betydelse i framtiden. Utveckling går mot nollutsläpp av avfall, hög effektivisering avseende energianvändning och användning av förnyelsebar råvara.

Forskningen inom kemisk processteknik måste i framtiden kunna möta produkt- och processutveckling på flera olika skalnivåer, från bulkprocesser till molekylära processer (exempelvis avgassystem i lastbilar). Detta innebär att området ökar tonvikten mot grundläggande vetenskaper inom både molekylära system och system på makronivå. Matematisk modellering kommer att bli ännu viktigare framöver och kommer att innefatta modellering på olika nivåer, från makroskopiska processmodeller som beskriver t.ex. transportprocesser, ner till termodynamiska eller andra molekylära modeller. Kombinationer av modellsystemen kommer i allt större utsträckning användas för att karakterisera processsystem och beskriva hur utvalda processer ska kunna styras ner på molekylär nivå för att uppnå en önskad produkt. Detta innebär även att ämnesöverskridande forskning mot t.ex. reglerteknik behöver ökas.

Internationellt är forskningsområdet i gränsen mellan kemisk processteknik och fluidmekanik på stark framfart. Problem som nu angrips teoretiskt och experimentellt innefattar flerfasströmning, icke-newtonsk reologi och kopplade processer. Flera av de större kemitekniska forskningscentra i Europa har omfattande forskning inom området.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Svensk forskning och utveckling inom kemisk processteknik och livsmedelsteknik innefattar ett brett spektrum av aktiviteter. Sveriges ställning, i ett internationellt perspektiv, är medelstark till stark.

Sverige satsar idag en hel del på forskning riktad mot bioraffinering och biologiska system inom biotekniken, där utveckling av biologiska produktionssystem ingår som en del. Här finns stora möjligheter till utveckling av nya innovativa produktionsprocesser inom livsmedelsteknik och produktion av kemikalier. Kombinationen med kemisk processteknik är här avgörande för utvecklingen av nya hållbara processer. Under de senaste åren har akademien till viss grad ökat nyrekryteringen av unga forskare inom området kemiteknik, men med hänsyn till det stora antalet pensionsavgångar under de närmaste fem till sju åren så behöver mer göras för att säkra återväxten.

Avsaknaden av starka forskningsmiljöer med tydliga profiler gör kemiteknisk forskning relativt osynlig, vilket försvårar rekrytering av studenter och forskare till området. Detta bidrar även till svårigheterna att attrahera industrin till att tillsammans med akademien skapa nödvändiga forskningsplattformar. Även de senaste årens frånvaro av medel för processteknisk forskning i utlysningar från statliga forskningsfinansiärer kan i viss mån förklaras av kemiteknikens brist på synlighet.

Utbildningen av morgondagens forskare och ingenjörer i kemisk processteknik behöver utvecklas för att ta hänsyn till områdets breddning till flera skalnivåer och ökande användning av modellering och ämnesöverskridande forskning.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Utvecklingen i kemisk process- och livsmedelsteknik går mot mer detaljerade och grundläggande experimentella undersökningar i mindre skala för att erhålla en fysikalisk och kemisk mekanistisk förståelse.

Samtidigt ökar forskningen inom integrerade/kombinerade modeller på olika skalnivåer för komplexa system. Detta innebär ett ökat behov av större satsningar på infrastruktur i form av avancerade instrument och mättekniker för att studera grundläggande förlopp samt apparatur i pilotskala för att skapa underlag för att verifiera komplexa modeller på makronivå. Experiment i större skala görs i dagsläget huvudsakligen i nära samarbete med olika industriföretag. Detta är naturligtvis inte alltid optimalt beträffande tillgänglighet och instrumentering. Den starka kopplingen till industrin gör även att det kan bli stora svängningar i finansiering av driften eftersom industrin ofta har en kortare planeringshorisont för FoU än vad som krävs för att driva en större infrastruktur. Hela det kemitekniska området, vilket inkluderar kemisk process-, livsmedels-, cellulosa- och fiberteknik, har liknande behov av större nationella satsningar på infrastruktur med centra för processutveckling, transportprocesser och materialkaraktisering. Detta gäller även för angränsande områden som miljö- och energiteknik, samt transport- och fordonsforskning.

## Övergripande områdesbeskrivning

Matematiska och statistiska metoder är oundgängliga inslag inom snart sagt alla vetenskaper. Inte minst som en följd av den explosionsartade utvecklingen på många håll av storleken på de datamängder som behöver analyseras växer behovet av de nya metoder som utvecklas inom framför allt beräkningsmatematik och matematisk statistik. Ur ett allmänvetenskapligt perspektiv kan det därför synas frestande att framhålla just dessa mer tillämpningsnära delar av de matematiska vetenskaperna som viktiga att satsa på. En alltför ensidig sådan satsning vore dock ett misstag, då den i längden skulle leda till en utarmning av även den tillämpade och interdisciplinära verksamheten, som en följd av den höga grad i vilken matematiska framsteg sker genom utbyte mellan olika delområden.

Vad gäller matematikens utveckling i det nya millenniet kan man peka på enskilda framgångar som ryssen Grigori Perelmans lösning av Poincarés förmodan 2003 och den kinesisk-amerikanske matematikern Yitang Zhangs spektakulära genombrott 2013 rörande gap mellan primtal. Ännu viktigare är dock det mycket bredare framåtskridande som sker utanför rampljuset. Den kanske tydligaste utvecklingslinjen härvidlag är just hur framsteg tenderar att komma genom interaktion mellan exempelvis algebra och analys, eller andra områden som tidigare ansetts åtskilda.

Jämte matematikens betydelse för andra ämnen finns också avgörande påverkan åt motsatt håll.

Fysikens inflytande på viktiga delar av matematiken är väl känt och har pågått i århundranden. Detta fortsätter, men även andra ämnen som kanske i första hand biologi driver i ökande grad på utvecklingen inom bland annat beräkningsmatematiken.

I den utvärdering *Evaluation of Swedish Research of Mathematics* som Vetenskapsrådet lät göra 2010-2011 heter det att ”Sverige har en lång och stolt tradition vad gäller matematisk excellens”, och vidare att jämte ”traditionen av excellens inom analys och sannolikhetsteori” nu också föreligger ”stark verksamhet inom algebraisk geometri, diskret matematik och dynamiska system”, samtidigt som ”tillämpad matematik på senare år blomstrat”. Under stora delar av 1900-talet var det lätt att peka ut några få individer som genom enastående och världsledande insatser gick i bräschen för svensk matematik. Idag är de viktigaste svenska bidragen till de matematiska vetenskapernas framåtskridande fördelade över långt fler individer och ett långt bredare spektrum av områden.

Andra tendenser är mer bekymmersamma för svensk matematik. Sagda utvärdering framhåller framför allt hur undervisningstungt ämnet är i kombination med otillräcklig forskningsfinansiering, vilket vanligtvis ger den enskilde forskaren alltför lite tid till forskning. Härvidlag utgör särskilda satsningar som Vetenskapsrådet och ett par andra forskningsfinansiärer sedan dess lanserat steg i rätt riktning, men problemet kvarstår till stor del. Ett särskilt bekymmer är att senare års trend mot forskningsmiljösatsningar och liknande större bidrag inte passar de matematiska vetenskapernas inommatematiska delar särskilt väl. Verkliga matematiska framsteg tenderar att göras av individer på ett opredikterbart sätt, och den miljö i vilken den enskilde forskaren finner sin främsta intellektuella näring tenderar att vara ett löst sammanfogat globalt nätverk av specialister, snarare än den lokala miljön.

Det ökande utbytet mellan matematikens olika grenar gör samtidigt att den lokala miljön inte oviktig. Helst bör alla matematikens större delområden vara representerade på åtminstone de större svenska lärosätena, något som inte fullt ut är uppfyllt idag.

Institut Mittag-Leffler har sedan 60-talet spelat en viktig roll – och fortsätter att göra det – som mötesplats och infrastruktur för svensk och internationell matematik. Det är angeläget att institutet får en långsiktigt stabil finansiering.



# Algebra, geometri och talteori

## Beskrivning av forskning inom ämnet

Geometri och talteori har båda en flertusenårig historia och är grundläggande för mänskligt tänkande. Enligt Klein bör geometrin inriktas på studiet av egenskaper som bevaras av transformationer såsom speglingar, vridningar och translationer eller mer sammansatta operationer som isometrier och kontinuerliga deformationer. Beroende på vilka transformationer man väljer får man olika typer av geometri såsom Euklidisk geometri, Riemanngeometri eller topologi. I modern geometri är alltsedan Riemann mångfaldsbegreppet centralt. Det finns algebraiska, analytiska differentierbara och topologiska mångfalder.

I Sverige har den algebraiska geometrin dominerat, på vissa håll med en algebraisk prägel medan den på annat håll varit mer renodlat geometrisk eller motiverats av problem i talteori. Differentialgeometrin är inte lika utbredd, men svenska forskare har uppnått viktiga resultat om minimalytor, liksom inom Kählergeometri och allmän relativitetsteori.

Inom forskarvärlden har ordet algebra en något annan innebörd än den elementära algebra som studeras i skolan. Med algebra avses studiet av kompositioner på mängder som uppfyller olika axiom och på universiteten undervisas särskilt om grupper, ringar och kroppar. Denna abstrakta algebra började utvecklas på 1800-talet även om vissa konkreta exempel studerats långt tidigare. Bland de senaste utvecklade strukturerna inom abstrakt algebra kan nämnas operader om vilka bedrivits svensk forskning av hög kvalitet.

I talteorin studerar man heltalen och andra tal man kan härleda utifrån dem såsom rationella tal och algebraiska heltal. Metoderna inom talteori är både algebraiska och analytiska, och intimt förbundna med algebraisk geometri och automorfa former. I Sverige dominerar numera den analytiska talteorin, men det forskas även om diofantiska ekvationer och inom ergodisk talteori.

## Styrkor och svagheter

Algebra, geometri, topologi och talteori utgör alla viktiga delar av matematiken. Forskningen inom dessa områden har mest bedrivits av enskilda framstående forskare, snarare än av väl sammanhållna forskargrupper.

Torsten Ekedahls död 2011 innebär att den franskinspireerade mer teorikrävande matematiken med Grothendieck som portalfigur förlorat sin främste företrädare i Sverige. Svenska matematiker har tidigare mest varit inriktade på att lösa enskilda problem inom väl avgränsade områden, men inte så intresserade av att tillgodogöra sig och utveckla större teorier. Detta är förmodligen den största svagheten i svensk matematik jämfört med länder som Frankrike, Japan och Tyskland. Det är därför viktigt att de yngre matematiker som vill arbeta inom områden med avancerade teorier får chansen att utvecklas och tid att lära sig den teori som krävs. Vikten av detta understryks av hur skör den svenska verksamheten är då ledande personer avlider eller (vilket vi också nyligen sett exempel på) flyttar utomlands.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Vid en av de svenska matematikforskningsmiljöerna har algebran haft en stark ställning under flera decennier, men det är egentligen det enda exemplet på en större svensk gruppering inom de grenar av matematiken som här behandlas. I övrigt rör det sig om mindre grupperingar och om individer.

Framför allt har forskningen i algebraisk geometri hållit hög kvalitet. Profilen har skiljt sig något åt mellan lärosätena: på vissa håll har gränsen mellan algebra och analys varit tydlig medan det på annat håll funnits ett visst utbyte mellan forskare i komplex analys och algebraisk geometri, vilket givit upphov till en miljö mer lik den på kontinenten där det är rätt vanligt att man kombinerar metoder från algebra och analys.

I 2010 års ämnesöversikt framhölls hur pass få topologer som var verksamma i Sverige. Detta har nu förbättrats genom nyanställningar på ett par håll, men jämfört med Danmark och Norge är forskningen i algebraisk topologi ännu liten. Det finns god forskning i geometrisk topologi och symplektisk geometri, men tills helt nyligen mer på individnivå än i grupp. Andra intressen som representationsteori och kombinatorisk snittkohomologi finns också företrädda. Totalt sett är algebran rätt väl representerad vid de större lärosätena.

Den algebraiska talteorin har dock försvunnit. Istället har under 2000-talet utvecklats ett samarbete med ledande europeiska analytiska talteoretiker om diofantiska ekvationer. Den analytiska talteorin har också stärkts påtagligt med flera framstående yngre professorer, och även vad gäller sambandet mellan erdogodteori och talteori finns viss ljusning.

Vad gäller ämnesmässiga trender är algebraisk geometri och talteori uppsplittrade på så många delområden att de är svårt att peka på några allmänna tendenser. Det är också riskabelt att göra förutsägelser då forskningsläget kan skifta mycket snabbt. Exempelvis rädde fram tills för något år sedan brist på nya idéer inom sällteorin för primtal, vilket nu förändrats genom Zhangs och Maynards spektakulära arbeten om primtalsgap så att detta istället blivit den hetaste grenen inom talteori. Inte ens de allra mest optimistiska experterna hade väntat sig detta. Detta visar det tvivelaktiga i att låsa fast stora forskningsresurser i stora centralstyrda projekt, som sällan leder till nyskapande matematik. Det är då mer effektivt att satsa på enskilda självständiga forskare av Zhangs typ och låta dessa få välja sina problem på egen hand.

Inom algebran kan man dock peka på en trend som pågått i snart 60 år. De mest högstående formerna av algebra har under denna period utvecklats i samverkan med algebraisk geometri, algebraisk talteori, algebraisk topologi och strängteori. Att bara studera algebra för sin egen skull utifrån abstrakta axiomssystem har inte visat sig lika fruktbart. Så samtidigt som de algebraiska metoderna blivit allt viktigare inom matematiken och numera även används av allt fler analytiker så har de nya impulserna inom algebran ofta kommit utifrån.

Exempelvis hade teorin för operader knappast varit lika intressant utan influenserna från algebraisk topologi, algebraisk geometri och matematisk fysik. Den som betytt mest för utvecklingen av de moderna algebraiska metoderna är utan tvekan Grothendieck. I den moderna algebraiska geometrin som skapades av honom har algebraiska mångfalders ersatts av scheman där de lokala koordinatringarna kan vara godtyckliga kommutativa ringar. En annan viktig del av hans livsverk är det systematiska användandet av homologisk algebra som därigenom mottagit nya impulser från algebraisk geometri efter att från början mest ha varit en biprodukt av algebraisk topologi. Trots att det nu gått 40 år sedan Grothendieck drog sig tillbaka är hans inflytande på dagens matematik ännu stort. Denna matematik är mycket olik den som traditionellt dominerat i Sverige och det var först genom Torsten Ekedahl som den fick en kraftfull företrädare i vårt land.

Den mest oväntade utvecklingen av algebran och geometrin har nog varit inflödet av idéer från matematisk fysik där matematiker från Ryssland och Ukraina som Kontsevich och Drinfeld haft en nyckelroll. I Sverige bedrivs forskning exempelvis om deformationskvantisering och om kvantgrupper och Yang-Baxters ekvation.

Inom flera geometriska områden har de senaste decenniernas utveckling präglats av studiet av lösningsrum till partiella differentialekvationer som på ett naturligt sätt underordnats den geometriska strukturen. Denna utveckling är nära sammanflätad med fysikens topologiska strängteori och gaugeteori, och området finns representerat i Sverige.

Ett annat exempel på inflytandet från matematisk fysik utgörs av s.k. månsken vilket är ett mystiskt samband mellan modulära former och representationsteori för vissa ändliga enkla grupper, som bäst förstås utifrån konform fältteori och strängteori. Området har belönats med en Fieldsmedalj och har de sista åren fått ny aktualitet genom det av fysiker upptäckta Mathieu-månskenet vilket binder samman elliptiska kohomologin för  $K3$ -ytor med sofistikerade modulära former av Jacobityp och med representationsteorin för grupper. Detta är ren matematik som omfattar såväl algebra, geometri, topologi som talteori. I Sverige har detta lett till stimulerande möten mellan strängteoretiker och matematiker. Vid ett av våra lärosäten finns ett mer utvecklat samarbete där man exempelvis studerat femdimensionell kontaktgeometri och dess relation till Chern-Simons teori och topologisk strängteori.

Den moderna matematiska fysiken har därmed givit incitament till algebran och geometrin på samma sätt som den klassiska fysiken tidigare drev på utvecklingen av partiella differentialekvationer, relativitetsteorin utvecklingen av differentialgeometrin och kvantmekaniken utvecklingen av funktionalanalysen. Exempelvis har den av fysiker upptäckta spegelsymmetrin gjort att man kunnat lösa problem inom enumerativ algebraisk geometri som tidigare ansetts vara utom räckhåll.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Algebra, geometri och talteori är viktiga delar av matematiken med en lång och rik historia. Under lång tid fanns det dock få svenska forskare inom dessa områden jämfört med den matematiska analysen. Det var först kring 1970 som den första svenska forskargruppen i algebra kom till. Ett par decennier senare tillkom professorer i algebraisk geometri och i algebra på andra lärosäten. På 90- och 00-talen tillkom liknande förstärkningar inom analytisk talteori och topologi.

Jämfört med de stora västeuropeiska länderna är likväl antalet forskare inom dessa områden litet, vilket är olyckligt med tanke på områdenas centrala ställning i matematiken – omvittnat av hur fleratlet av de matematiker som erhållit Fieldsmedaljer och andra viktiga matematikpriser de sista 60 åren varit verksamma inom algebra, geometri, topologi eller talteori. Om inte dessa områden stärks riskerar därför Sverige att hamna på efterkälken i matematikens internationella utveckling.

Algebraisk geometri betraktas allmänt som det kanske mest teoritunga området inom matematiken; i synnerhet gäller detta den aritmetiska grenen. Många av de tongivande professorerna vid Harvard, Princeton, MIT, Berkeley och andra ledande universitet och många av Fieldspristagarna är verksamma inom detta område. Det är dock svårt att bedriva vid mindre högskolor då det är så krävande. En allvarlig risk är att rekryteringen av yngre talanger till området skadas av simplistiskt bruk av bibliometri vid tjänstetillsättningar och utvärderingar, något som gynnar enklare områden med lite teori och missgynnar områden med hög svårighetsgrad och mycket teori.

Matematikens inneboende dynamik, som den skisserats ovan, rimmar illa med tendensen till ensidiga satsningar på stora forskningsprojekt inom ”strategiska” områden. Vilka aktuella områden som än identifieras och prioriteras, så kommer situationen att vara annorlunda om 5–10 år. Erfarenheten har visat att det är individer som gör de stora genombrotten och att det inte går att förutse när och från vem. Därför optimeras möjligheterna genom att så många tillräckligt kvalificerade matematiker som möjligt får tid att forska inom sin anställning, enligt internationell förebild.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Liksom för svensk matematik i stort gäller inom de här behandlade grenarna av matematiken att Institut Mittag-Leffler är den viktigaste infrastrukturen.

## Matematisk analys

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Svensk matematisk analys har en stolt tradition. Sverige var tillsammans med Chicago och Princeton världsledande inom klassisk analys under en stor del av 1900-talet. Analys är traditionellt det starkaste området inom svensk matematik och är av internationellt högsta klass. Den svenska forskningen inom analys bedrivs fortfarande till stor del inom de klassiska områdena: komplex och harmonisk analys och partiella differentialekvationer. Nya områden har emellertid etablerats – ofta med anknytning till de klassiska. Exempel på detta är teorin för analytiska funktioner av flera komplexa variabler, dynamiska system, gränsområdena mellan sannolikhets teori och analys, konform invarians av stokastiska processer, spektralteori för slumpmatriser och matematisk fysik.

Matematisk analys utgör ett mycket stort område i matematiken och har traditionellt en stark anknytning till tillämpningar inom naturvetenskap och teknik. Många metoder har utvecklats för lösa specifika problem, och analys spelar en viktig roll inom bland annat elektroteknik, signalbehandling, hållfasthetslära, reglerteknik, fysik, kemi och biologi.

Det finns framför allt två traditioner i svensk analys. Den ena är Uppsala/Stockholmskolan vars område är harmonisk och komplex analys. Upphovsmännen är här Arne Beurling och Lennart Carleson. Den andra traditionen är Lundaskolan vars område är partiella differentialekvationer, där Marcel Riesz, Lars Gårding och Lars Hörmander initialt var de drivande krafterna. En annan gigant i svensk analys är Torsten Carleman, som

arbetade i samtliga dessa områden, men som inte på samma sätt gav upphov till en skolbildning med sina elever.

Områden som utvecklades av Beurlings och Carlesons skola var spektralsyntes i harmonisk analys, operatorteori, hela funktioner, och Dirichletrum. Speciellt kan nämnas extremallängdsmetoder i geometrisk funktionsteori som Beurling utvecklade samarbete med Lars Ahlfors, och Carlesons resultat om koronasatsen och Lusins problem för konvergens av Fourierserier. Även teorin om wavelets har sitt ursprung i Sverige och är nu central inom beräkningsmatematik.

Hörmander är den forskare som har haft störst inflytande på teorin för linjära partiella differentialekvationer. Många av de centrala begreppen och idéerna härstammar från honom, däribland mikrolokal analys med användandet av pseudodifferentialoperatorer och Fourierintegraloperatorer. Hörmander har haft ett utomordentligt stort inflytande genom sina studenter. Viktiga resultat har uppnåtts, bland annat så var lösningen av en förmodan av Nirenberg och Trèves om lösbarhet för partiella differentialekvationer av en svensk forskare 2005 ett stort genombrott.

Ett i Sverige starkt och väl företrätt område är komplex analys i flera variabler, som metodmässigt lånat mycket från teorin för partiella differentialekvationer, men som också har anknytning till geometri. En nyare influens är spektralteori för partiella differentialoperatorer. Ett område som initierades i Sverige på 1970-talet om variationskalkyl på rummet av begränsade funktioner har under de senaste åren visat sig ha många tillämpningar. Teorin för homogenisering har utvecklats till ett kraftfullt verktyg inom tillämpningsområdena. Ännu ett område, med viktiga tillämpningar inom bland annat finansmatematik, är teorin för fria randvärdesproblem för partiella differentialekvationer. Icke-linjär harmonisk analys, där man studerar  $p$ -Laplace och liknande operatorer, är också ett område som har vuxit de senaste decennierna. Här kan nämnas Harnackolikheten på randen för  $p$ -Laplaceoperatorn, som en svensk analytiker bevisade 2010 i internationellt samarbete.

Ett av de nyare områdena är dynamiska system, som naturligt ligger mycket nära teorin för ordinära differentialekvationer, men som i Sverige har anknytning till harmonisk och komplex analys samt geometri. En viktig framgång var beviset att Hénonattraktorn är kaotisk. Detta bevis ledde till nya metoder i icke-likformigt hyperboliska dynamiska system som delvis är inspirerad av harmonisk analys. En annan framgång är det datorbaserade beviset av att Lorenzattraktorn är kaotisk. Arbeten om små nämnare i dynamiska system, de så kallade Lindstedtsserierna som beskriver celest mekanik, har också rönt stor uppmärksamhet, liksom spektralteori för Schrödingeroperatorer.

En viktig trend i Sverige, och även internationellt, är växelverkan mellan matematisk analys och sannolikhets teori. Denna interaktion har under den senaste tiden varit mycket framgångsrik både i Sverige och internationellt, och trenden kan förväntas fortsätta. Områden under stark utveckling är spektralteori för slumpmatriser och stokastiska diskreta strukturer med anknytning till konform avbildning. Det kanske mest uppmärksammade resultat som gjorts i Sverige under de senaste tio åren är beviset av konform invarians av kritisk perkolation 2001. Detta resultat var ett av huvudmotiven till en av 2010 års Fieldsmedaljer. Den svenska traditionen och kompetensen inom geometrisk komplex analys spelade en viktig roll i denna utveckling.

Några nya områden i svensk matematik som också växelverkar med analys är analytisk talteori med anknytning till kvantkaos, differentialgeometri med anknytning till allmän relativitetsteori, samt topologiska metoder för variationsproblem. Ett uppmärksammat resultat var att en svensk matematiker 2009 visade att den kosmiska censorsprincipen gäller för en viktig klass av Einsteinmetriker på den tredimensionella torusen.

En mera tillämpad inriktning är användningen av metoder från harmonisk analys för att organisera datamängder (diffusionsgeometri). En annan är teorin för inversa problem, till exempel inom datortomografi. Här kan nämnas lösningen 2006 av Calderons inversa konduktivitetsproblem i planet av finska forskare. En svensk forskare i internationellt samarbete gav 2007 ett viktigt bidrag till teorin i högre dimension.

## Styrkor och svagheter

Styrkan i svensk analys bottnar, som framgår av det ovan sagda, i den långa och starka traditionen. Svenska analytiker har därför mycket goda internationella kontakter, ofta genom Institut Mittag-Leffler. De presterar

högklassig och internationellt uppmärksammas forskning, som har exemplifierats ovan. Återväxten inom analys är stark, vilket avspeglas t ex i de senaste årens Wallenberg- och Gustafssonpristagare.

En svaghet är forskningsfinansieringen. Matematik är ett undervisningstungt ämne, och med minskade fakultetsanslag måste även professorer söka medel för sin forskningstid. Med sådan konkurrens blir det svårt för unga forskare i karriären att kunna få anslag. Detta medför att det finns begränsade möjligheter att bedriva forskning i tjänsten för lektorer och även för flertalet professorer. En konsekvens är forskarflykt – många framstående svenskar väljer en karriär utomlands där forskning är garanterad inom tjänsten. Vetenskapsrådets egen utvärdering av matematikämnet 2010 påpekade att matematikämnets forskningsfinansiering var låg i ett internationellt perspektiv. En riktad satsning från Vetenskapsrådet (utöver den nu pågående specialsatsning som inte förmått påverka situationen i ämnet mer än marginellt) skulle kunna förbättra situationen, liksom naturligtvis förstärkta basresurser på universiteten.

Ett annan svaghet är att tvärvetenskapliga projekt som involverar analys kan falla mellan stolarna, exempelvis på Vetenskapsrådet, och det kan vara värt att följa effekterna av Vetenskapsrådets nya modell för hantering av tvärvetenskap.

Slutligen så finns ett kroniskt problem med dålig mobilitet av forskare, vilka i alltför hög grad tenderar att stanna på samma universitet där man påbörjade sin utbildning. Detta är mycket en konsekvens av bristande resurser för postdoktorer och av 1999 års befordringsreform.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Den höga internationella nivå som svensk analys har och den breddning mot nya områden som skett under senare tid skapar en god potential för en fortsatt stark och framgångsrik verksamhet. Väsentliga utvecklingslinjer framöver kommer att vara gränsområden mellan olika delar av analys och även mot andra områden i matematiken, t ex icke-linjära partiella differentialekvationer/geometri/matematisk fysik, analys/sannolikhets teori/kombinatorik och spektral teori/talteori/dynamiska system. Det finns också en stark tendens att närma sig och få inspiration från exempelvis fysiken. Ett exempel är utvecklingen inom perkolation och partiella differentialekvationer liksom den inom spektral teori. Svensk analys har, med rätt stöd, goda förutsättningar att lämna väsentliga bidrag till utvecklingen i dessa och andra gränsområden.

Ett aktuellt område som har stark anknytning till de svenska traditionerna är partiella differentialekvationer, både linjära och icke-linjära, där man har en mycket intressant växelverkan mellan harmonisk analys, global analys, och dynamiska system. Ett exempel är matematisk relativitet och studiet av Einsteinekvationerna, där verktyg nu har utvecklats för att kunna studera den kosmiska censorsproblemet. Det centrala problemet i detta område är förståelsen av Navier-Stokes ekvationer och uppkomsten av turbulens, vilket är ett av de berömda millennieproblemen.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Analysens ställning i Sverige är fortsatt stark, även om den av naturliga skäl har relativt sett minskat de senaste femtio åren. Utvecklingen inom nya områden har varit stark och det finns en kraftig tillväxt inom t ex dynamiska system, komplex analys och icke-linjära partiella differentialekvationer. Det finns även på många ställen en kraftig ökning av tillämpningar, där analytiska verktyg används. Det kan t ex vara användandet av mikrolokal analys för inversa problem inom t ex prospektering, homogenisering inom tribologi, och harmonisk analys inom signalbehandling.

Detta gäller även internationellt, där t ex Poincaréförmodan (ett av de berömda millennieproblemen) har lösts med metoder från partiella differentialekvationer (studiet av Ricciflödet). Nyligen skedde ett mycket uppmärksammat genombrott inom den analytiska talteorin för den berömda primtalstvillingsförmodan, vilket belönades med Schockpriset.

Ett sätt att se omvärldens uppskattning av svensk analys är att Lars Hörmander tilldelades Fieldsmedaljen 1962 och Lennart Carleson Abelpriset 2006. Båda har fått det israeliska Wolfpriset. Två svenskar, och en forskare verksam i Sverige, har fått Salempriset, den främsta utmärkelsen i klassisk analys. Clay Research Award har tilldelats en svensk analytiker.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Den viktigaste aspekten på infrastruktur för svensk och även nordisk matematik är Institut Mittag-Leffler. Detta institut är världsberömt och var det första i sitt slag. Institut Mittag-Leffler ger möjlighet för matematiker att få tid till forskning tillsammans med andra experter inom sitt ämnesområde. Det ger också stora möjligheter att få internationellt ledande forskare att besöka Sverige och samarbeta med svenska matematiker. En annan viktig aspekt är att mycket av rekryteringen av utländska matematiker till svenska universitet har kunnat genomföras i samband med deltagandet vid ett program vid institutet.

Många viktiga upptäckter har skett vid institutet. Till exempel så löste Lennart Carleson utvidgningsproblemet för kvasikonforma avbildningar i högre dimension i samarbete med finska matematiker under ett program vid institutet. Här kan nämnas att Institut Mittag-Leffler nu har kommit upp på Finlands Akademi's vägvisare för forskningens infrastruktur (Finland's roadmap for research infrastructures). Institutet har en stor potential att ytterligare öka sin insats för svensk och nordisk matematik och kunna stärka svenska matematikers kompetens.

## Beräkningsmatematik, optimering och matematisk modellering

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Beräkningsmatematik och optimering är en metodvetenskap för numeriska beräkningar och matematisk modellering inom naturvetenskap, teknik och samhällsvetenskap. Ämnet omfattar matematisk analys och algoritmutveckling, studium av matematiska modeller för tillämpningar, numeriska experiment samt programutveckling.

Beräkningsmatematiken initierades i samband med konstruktionen av de första datorerna på fyrtioalet. Sveriges satsning på beräkningar var tidig med den egna datorn BESK som blev klar 1953. I ett internationellt perspektiv intog svensk forskning en ledande plats i analys och utveckling av metoder för lösning av differentialekvationer, vilka bildar basen för modellering i naturvetenskap.

Idag har numeriska metoder för lösning av differentialekvationer fortfarande en central plats inom ämnet, men de ekvationer som studeras har ökat i komplexitet när man nu betraktar till exempel problem med många rums- och tidsskalor, modeller som kopplar ihop olika fysikaliska ekvationer, stokastiska modeller och tidsberoende beräkningsdomäner. Dessutom tillkommer problem i hög dimension, optimering av större problem, mer fundamental modellering inom nya ämnesområden och därmed närmare kontakt med tillämpningar. Beräkningsmatematikens tidigare fokus på fysikproblem och deterministisk kontinuummekanik breddas nu till att omfatta beräkningar i kemi och biologi (ofta med stokastisk modellering), diskreta högdimensionella problem i informationsvetenskap, och utveckling av nya algoritmer för ny datorarkitektur. Optimeringsområdet har också en viktig kombinatorisk sida, som vetter mer mot diskret matematik och mot datavetenskapens algoritmt teori.

### Styrkor och svagheter

Datorsimuleringar har idag blivit ett oersättligt verktyg som används av forskare och företag inom en mängd ämnesområden. Detta visar på ett tydligt behov av fortsatt forskning om numeriska metoder för att både möjliggöra simuleringar av allt mer komplexa problem och för att öka noggrannheten och effektiviteten hos de algoritmer som används. Det allt större genomslaget för beräkningar har dock förändrat förutsättningarna för beräkningsmatematiken. Matematiker dominerade användandet av de tidiga datorerna, medan de idag utför endast en bråkdel av alla datorsimuleringar.

Behov av nya och bättre algoritmer uppstår inom olika tillämpningar då man adresserar specifika frågeställningar och vill inkludera mer komplexitet i den matematiska modellen. Vissa egenskaper kan vara specifika för en tillämpning, men många tillämpningar har gemensamma utmaningar. Identifikation av generalitet görs effektivt av beräkningsmatematiker som har en nyckelroll i kunskapsöverföring genom utveckling av numeriska metoder för olika tillämpningar. Här behövs sofistikerad matematik för att förstå

egenskaperna hos moderna sofistikerade algoritmer. Det är väsentligt att beräkningsmatematiken är fortsatt väl förankrad i tvärvetenskapliga forskningssatsningar, till exempel inom e-science, liksom i forskningssammanslutningar inom olika tillämpningsområden där numeriska metoder används.

Forskningen inom beräkningsmatematik drivs även av intern ny utveckling inom ämnet och matematiken i stort. Exempel på tidigare sådan forskning är beräkningsmatematikernas insats i algoritmutveckling, från direkt Gausseliminering till avancerade multigriddmetoder, som har gett en tidsvinst för lösning av partiella differentialekvationer som står i paritet med hårdvarans fenomenala utveckling. Nya numeriska metoder som får genomslag designas och analyseras ofta först för modellproblem, och omfattande teoretisk utveckling krävs typiskt för att uppnå den vetenskapliga mognad som behövs för att applicera algoritmen på mer komplexa problem. Ett exempel är den pågående processen för utveckling av numeriska metoder för multiskalproblem. Detta nytänkande är avgörande för den framtida förmågan hos datorsimuleringar, och det är en viktig styrka inom beräkningsmatematiken. Komplexiteten i vad som räknas som modellproblem utökas kontinuerligt, och även i detta sammanhang är kontakten med tillämpningar viktig för att säkerställa att relevanta frågeställningar beaktas.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Djupet och bredden i matematiken utvecklas hela tiden samtidigt som realismen i naturvetenskapens modeller förbättras. Det blir därför allt svårare för en enskild forskare att följa med utvecklingen både i den djupare generalitet matematik får och i den mer krävande modellering som används i naturvetenskap. Forskningen både i matematik och i andra vetenskaper har dock mycket att vinna på att stimulera varandra. Där ser beräkningsmatematikern typiskt sin forskningsuppgift att aktivt bidra med ny matematisk modellering och beräkning för att lösa problem. Idag krävs ofta avancerade beräkningar för att kunna jämföra de teoretiska modellerna med experiment. I förra århundradet dominerades beräkningsmatematiken av problem i kontinuummekanik och behovet av direktkontakt med tillämpningar var inte så stort eftersom den matematiska förståelsen av dessa problem räckte långt. Med mer avancerad modellering idag krävs också mer kunskap om tillämpningar för att göra beräkningar. Traditionella beräkningar sätts också i ett större sammanhang, som till exempel att man istället för att bara beräkna hållfastheten i en konstruktion söker svar på den svårare frågan om att beräkna en optimal konstruktion som uppfyller givna last- och hållfasthetskrav eller att uppskatta säkerheten i ett svar givet osäkerheter i modell och indata. Det kräver mer av beräkningsmatematikern som nu ofta behöver expertkunskap inte bara om diskretisering av differentialekvationer, utan också om stokastisk modellering och optimering, jämte god kontakt med vetenskapsområdet för beräkningen.

Två tillämpningsområden som har ökat i betydelse är materialvetenskap och livsvetenskaper, och denna utveckling kommer med all säkerhet att fortsätta. En annan trend är utveckling av algoritmer och metoder för att hantera stora datamängder, ett område som många beräkningsmatematiker på senare tid engagerat sig i. Aerodynamiska beräkningar och simulering av annan klassisk strömmingsmekanik är fortfarande ett viktigt område för tillämpningar och industri, men avtar som centralt forskningsområde inom beräkningsmatematiken där forskningen nu är mer inriktad på andra områden såsom icke-Newtoniska flöden, mikro-fluidik etc. Intensiv beräkningsmatematisk forskning bedrivs nu för multi-fysik problem där differentialekvationsmodeller från olika delar av fysiken samverkar, och där gränserna mellan modellerna rör sig och ger en tidsberoende geometri. Exempel kan vara elastiska kroppar i vätska eller droppar där ytaktiva medel påverkar ytspänningen. Stokastisk modellering och simulering blir allt viktigare. Här är osäkerhetskvantifiering (UQ) ett stort område, där man till exempel vill svara på hur osäkerhet i matematiska modeller och indata påverkar tillförlitligheten i olika resultat. Monte Carlo metoder används för mycket beräkningsintensiva problem i hög dimension. Där det tidigare användes deterministiska modeller inom optimering används idag modeller som inkluderar robusthet, flermålsoptimering och stokastik.

Den moderna forskningen i beräkningsmatematik och optimering kräver relativt djupa kunskaper i tillämpningar och därmed bredare kompetens. En utmaning i detta är att organisera forskarutbildningen i tillämpad matematik för att bättre samverka med tillämpningar, utan att ge avkall på ämnets matematiska kärna. Dessutom krävs en samverkan mellan numerisk analys och matematisk statistik eftersom frågor om beräkning och osäkerhet i data blir alltmer integrerade. Internationellt ingår därför allt oftare matematisk

statistik/sannolikhetslära, numerisk analys och optimering som en enhet i forskarutbildningar i beräkningsmatematik.

Finansiering behövs både för mer tillämpningsnära forskning och till grundläggande metodutveckling. Det finns en uppfattning bland ämnets professorer att det blivit allt svårare att finansiera grundläggande forskning som en följd av begränsad tillgång till fakultetsmedel på universiteten, de relativt små medel från Vetenskapsrådet som går till matematikforskning, och få andra finansieringsmöjligheter. Om denna trend inte bryts så hotas den starka internationella ställning som svensk beräkningsmatematik har uppnått över åren. Detta blir extra viktigt då det på ett flertal av universiteten just nu pågår en generationsväxling, där professorer och lektorer pensioneras, och nya biträdande lektorer och lektorer anställs. Överlag tillsätts tjänster i hård konkurrens, och de nya personer som anställs är excellenta forskare med ambitiösa mål för sin forskning. Här behövs satsningar för att möjliggöra en långsiktigt gynnsam utveckling och motverka den tidigare så vanliga uppdelningen i forskande och undervisande personal. Sverige är ett litet land med internationellt sett små forskningsmiljöer men här finns en stor utvecklingspotential där forskningsmiljöer med fler aktiva forskare kan skapas. Om undervisningen i större grad utförs av forskningsaktiv fakultet stärker det dessutom svenska universitets anseende och borgar för en bättre utbildning av morgondagens forskare.

Andelen kvinnor inom professionen är fortfarande låg. Endast vid ett par svenska lärosäten finns kvinnliga professorer i ämnet – lärosäten som också uppvisar den högsta andelen kvinnliga biträdande lektorer och lektorer. Sett till könsfördelningen av forskarstudierande så borde det finnas möjligheter att öka andelen kvinnlig fakultet. För detta krävs dock ett medvetet arbete. Specifikt måste duktiga kvinnor aktivt identifieras och uppmuntras att söka utannonserade tjänster, och också ges goda förutsättningar för att bedriva sin forskning då de anställs.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Den första svenska professuren i numerisk analys inrättades på KTH 1963. Beräkningsmatematiken fick tidigt en stark ställning i Sverige, med forskning på högsta internationella nivå. Svenska exempel på algoritmutveckling under de första årtiondena reflekterar de verksamheter som byggdes upp. Här kan bland annat nämnas numerisk simulering av differentialekvationer, algoritmer inom linjär algebra, de första wavelet-metoderna samt adaptiva metoder med inbyggd felkontroll.

Sverige hävdar sig fortsatt bra internationellt i dagsläget, men det finns risk för en underkritisk storlek i fortsättningen. Det är av yttersta vikt att fortsatt säkerställa kvaliteten och bredden på forskningen ute på universiteten. Det behövs också resurser för internationellt utbyte, både för att svenska forskare skall kunna tillbringa tid utomlands och internationella experter skall kunna vara i Sverige. Intressant att notera är att matematikinstitutioner som traditionellt enbart fokuserat på ren matematik, exempelvis Harvard University och University of Chicago, nu gör mycket stora satsningar inom beräkningsmatematik.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Storskaliga beräkningar stimulerar matematisk forskning med nya problem och dessa beräkningar bidrar också till ökad samverkan med andra vetenskaper. Därför är investeringar i superdatorer värdefulla, liksom de e-science miljöer (SeRC, eSENCE) som utvecklats under de senaste åren. För att uppnå den fulla nytta som beräkningsmatematiker kan ha i dessa miljöer så krävs det dock en finansiering som möjliggör ett aktivt deltagande.

Institut Mittag-Leffler är annars den svenska matematikforskningens viktigaste infrastruktur, och torde ha potential att ytterligare öka sin insats för svensk matematik genom större inslag av beräkningsmatematik i verksamheten.



# Diskret matematik och logik

## Beskrivning av forskningen inom ämnet

Med diskret matematik menas studiet av diskreta, ofta ändliga, strukturer och relationer på dessa strukturer. Viktiga delområden är algebraisk kombinatorik, topologisk och geometrisk kombinatorik, exakt och asymptotisk räkning, extremal kombinatorik, kombinatorisk design och kodteori, grafteori (med många viktiga delområden), probabilistisk kombinatorik, diskret optimering och spelteori. Det finns ett stort mått av interaktion med andra områden, särskilt algebra, datalogi, talteori, sannolikhetssteori och statistisk mekanik. Ofta är det svårt att göra en exakt uppdelning av vad som tillhör vilket område, vilket är en allmän trend inom matematik. Det senaste decenniet har det också dykt upp allt fler bra exempel på synergi mellan den diskreta matematiken och analys.

Matematisk logik delas klassiskt upp i de fyra områdena; mängdlära, modellteori, beräkningsbarhet och bevisteori. Nya gränsområden har tillkommit i samverkan med datalogin, speciellt relaterat till komplexitetsteori, och semantik för programmeringsspråk och automatisk verifikation av system. Det finns även betydande kontaktpunkter med övrig forskning i matematik. Noterbara exempel: via kategoriteori som ger intressanta kopplingar mellan typteori och algebraisk topologi, mellan modellteori och aritmetisk algebraisk geometri, samt mellan deskriptiv mängdteori och operatorsteori och dynamiska system.

## Styrkor och svagheter

Den svenska forskningen inom diskret matematik har en mycket stark internationell ställning. Även om diskret matematik till omfattningen inte är ett lika stort ämne i Sverige som internationellt, så är mycket av den forskning som bedrivs i Sverige inom diskret matematik av mycket hög kvalitet. Här finns en forskargruppering av yttersta världsklass inom algebraisk, topologisk och probabilistisk kombinatorik, liksom en internationellt mycket konkurrenskraftig gruppering inom grafteori. Tidigare var den framgångsrika verksamheten på området väsentligen begränsad till ett par lärosäten, men en positiv trend det senaste decenniet är att antalet lärosäten med framstående forskare i diskret matematik ökar. På ett antal lärosäten saknas emellertid fortfarande konkurrenskraftig forskning i diskret matematik.

Det finns delområden av den diskreta matematiken som inte är så starkt representerade i Sverige eller som kommer att helt sakna representanter efter pensionsavgångarna de närmaste åren. Exempel på ett sådant ämne är designteori/ändliga geometrier. Det är dock inte alls säkert att det bästa sättet är att satsa på just de ämnena utan bättre vore att satsa på de talanger som finns med intresse av diskret matematik som vill jobba i Sverige (gärna efter en doktorsexamen utomlands). Diskret matematik är inne i en generationsväxling. Hittills ser det ut som om Sverige är på väg att klara den mycket bra, men det behövs fler unga skickliga forskare det närmaste decenniet.

Inom matematisk logik har Sverige mycket starka forskargrupper framförallt inom modellteori, bevisteori och konstruktivism, särskilt så kallad typteori. De starka forskargrupperna är koncentrerade till några få universitet, men god forskning av enstaka personer finns även på andra lärosäten.

Forskningen bedrivs ofta i tätt samarbete med kollegor i andra länder och svenska forskare är vanliga deltagare på internationella konferenser. Det är också en strid ström av utländska forskare som besöker svenska lärosäten. Det blir särskilt tydligt de terminer som Institut Mittag-Leffler har ett tema inom diskret matematik eller logik.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Den diskreta matematiken har blivit allt tätare sammankopplad med andra områden. En trend är att den algebraiska kombinatoriken fortsatt att växa kraftigt internationellt. Delar av algebra där kombinatoriska metoder har visat sig verkningsfulla har, liksom algebraiska metoder, haft stor inverkan på studiet av kombinatoriska objekt. En annan tydlig trend de senaste 10 åren är extremalkombinatorikens framgångar. Där har Szemeridis regularitetslemma från grafteorin banat väg för en rad tillämpningar inom talteori eller så kallad

additiv kombinatorik. Där finns just nu en kraftig våg av resultat med metoder omväxlande från kombinatorik och analys. Även i Sverige finns ett par forskare som har engagerat sig och bidragit med bra resultat i detta ämne. Den just avslutade terminen vid Institut Mittag-Leffler har bringat in ny kunskap och nya samarbeten, vilket förhoppningsvis kan leda till starka svenska framgångar även inom extremkombinatorik.

En annan mycket stark trend är den allt starkare kopplingen mellan kombinatorik och delar av sannolikhetslära, ofta (men inte alltid) kopplat till modeller från fysiken. Frågor om typiska formen på kombinatoriska objekt har lösts med metoder från sannolikhetslära och probabilistiska problem har lösts med kombinatoriska tekniker. Ett annat exempel är hur kombinatoriker skapat metoder för att bevisa negativ korrelation. Här har det senaste decenniet givit en stor mängd banbrytande resultat och flera av dessa har gjorts av svenska forskare.

Det finns ett flertal exempel på ett ökande utbyte mellan diskret matematik och analys. Ett färskt exempel är beviset av den kända Kadison-Singerförmodan där metoder från probabilistisk kombinatorik var avgörande. Tillämpningar av diskret matematik har sedan länge varit många inom datalogi, felrättande koder och kryptografi, statistisk experiment design, teoretisk fysik och diskret optimering. Detta har internationellt börjat kompletteras med diskreta modeller i biologin, biokombinatorik. Den moderna biologin är ofta diskret till sin natur med studier av nätverk, evolutionära träd och sekvenser av gener eller aminosyror. Här finns en stor potential både för att matematiken kan lösa problem inom medicinen och biologin, men också för att nya intressanta frågeställningar inom diskret matematik kan uppstå. Denna potential har inte utvecklats i Sverige på samma sätt som internationellt. Med tanke på den goda forskningen inom diskret matematik i Sverige torde här finnas goda möjligheter.

De klassiska områdena i matematisk logik fortsätter att utvecklas och har fortsatta kontakter med andra områden inom såväl matematik som övriga vetenskaper. Inom beräkningsbarhetsteorin studerar man nya modeller för beräkningsmekanismer som uppstår t.ex. i biologi och kemi. Det intima samband mellan homotopiteori och typteori via simpliciala mängder som nyligen upptäckts verkar ge en lovande växelverkan mellan algebraisk topologi och matematisk logik.

En trend är storskaliga formaliseringar av matematiska satsar med hjälp av så kallade bevisstödssystem, där metoder från typteori och bevisteori används. Man kan nämna fyrfärgssatsen och Feit-Thomsons udda-ordningsats för grupper, som getts fullständigt formella datorkontrollerade bevis. Projekt för andra ytterst komplicerade bevis pågår. De programbibliotek av delresultat, teorier och bevisstrategier som åstadkoms kan ofta återanvändas i andra sammanhang. Bevisstödssystem kopplas alltmer samman med annan matematisk programvara för att kunna kombinera rigorösa bevis med effektiva beräkningar.

Den matematiska logiken har sedan flera decennier haft starka kontakter med och gett viktiga bidrag till programvaruteknik. Det finns även aktiva företag som jobbar med att använda logik för att modellera och lösa problem. Flera disputerade forskare i både diskret matematik och logik har rekryterats till näringslivet det senaste decenniet för att där syssla med mycket högkvalitativa arbetsuppgifter där de får användning av sina specialistkunskaper.

De främsta hoten mot forskningen är den svåra finansieringssituationen för svenska matematiker.

Internationellt har diskret matematik haft en större förmåga att attrahera kvinnliga forskare än många andra områden i matematik, men i Sverige har det tyvärr inte varit fallet. Både inom diskret matematik och inom logik är den manliga dominansen i Sverige mycket stark. Det verkar troligt att forskningen kan bli ännu bättre om vi i framtiden kan lyckas attrahera också kvinnor till en forskningskarriär.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Forskningen i diskret matematik var av väldigt liten omfattning för 50 år sedan, men har sedan dess vuxit mycket kraftigt och internationellt blivit ett av de stora forskningsområdena. Utveckling har sporrats av frågeställningar från bland annat datalogi, optimering och informationsteknologi. På senare år har det breddats till att även omfatta frågeställningar från andra tillämpade områden som statistisk mekanik och teoretisk biologi. I Sverige tog forskningen i diskret matematik fart något senare. Kvantitativt är den diskreta matematiken fortfarande mindre än internationellt, men kvalitativt är stora delar av yppersta internationella klass.

Matematisk logik är ett väletablerat ämne internationellt. Sverige har ett antal mycket starka forskare och står sig väl.

## Särskilda behov av infrastruktur

Forskning i matematik görs ofta av individer eller små grupper av forskare. Forskning i matematik skalar inte, på samma sätt som i exempelvis många experimentella vetenskaper, upp i proportion till ökade anslag till enskilda personer. Med andra ord, en enskild forskare som redan har en god grundfinansiering kan inte fullt ut öka sina forskningsresultat proportionellt med ytterligare finansieringsökningar. I början av seklet fanns en stark trend att ge pengar till stora grupper eller starka forskningsmiljöer. Sedan ca 5 år tillbaka har det ersatts med specialsatsningar på att ge relativt mycket pengar till enskilda personer. Ingen av dessa modeller är lyckosam för matematiken.

Det är svårt att förutse vilka forskare som kommer att göra viktiga genombrott de närmaste åren och det är inte tydligt att en forskares möjligheter ökar att göra genombrott om hen får väldigt stora anslag. Det bästa för forskningen i matematik är om många forskare kan få en god basfinansiering. Därutöver skulle den mest effektiva satsningen på matematik troligen vara att öka de medel som Vetenskapsrådet beviljar till projekt i matematik och tillämpad matematik.

Av avgörande betydelse för den svenska matematiken är en fortsatt stabil finansiering av Institut Mittag-Leffler. Det är ofta som rekryteringar av utländska matematiker till Sverige börjar med ett besök där. En stor andel av alla svenska matematiker har Institut Mittag-Leffler att tacka för viktiga forskningsresultat, internationella kontakter och att de har startat nya forskningssamarbeten.

## Sannolikhetsteori och statistik

### Beskrivning av forskning inom ämnet

Sannolikhetsteori är den gren av matematiken som studerar slumpmodeller. Den utgör den matematiska grunden för statistik, och är ett viktigt redskap i en rad andra vetenskaper. På senare årtionden har den också kommit att spela en allt större roll som verktyg inom andra delar av matematiken.

Den statistiska vetenskapen utvecklar metoder för att använda data till att förstå och beskriva vår värld. Statistiska metoder och ett statistiskt synsätt används inom snart sagt all vetenskap, liksom inom industri och offentlig förvaltning. En särskilt central roll spelar statistiska metoder inom försäkringsindustri, finans, läkemedelsindustri och telekommunikation.

Modern sannolikhetsteori och statistik ger möjlighet att förstå och hantera alltmer komplicerade situationer. Det kan gälla hur information sprids i tekniska, sociala och biologiska nätverk, utveckling av sofistikerade beräkningsmetoder, eller hur brus förändrar signaler och bilder. Det kan också gälla hur anlag förändras och minskar livskraften hos en art. Ofta är forskningen inriktad mot risker: farliga biverkningar av mediciner, svängningar på de finansiella marknaderna, ett försäkringsbolag som hotas av konkurs, naturkatastrofer eller epidemier som tar fart i avsaknad av ett fullgott vaccin. Bayesianiska metoder baserade på ”subjektiva” sannolikheter har genom utvecklingen av nya beräkningsmetoder fått en renässans, dels för att lösa komplicerade statistiska problem, med också som ett eget verktyg för beslutsfattande expertsystem och argumentationsanalys.

### Styrkor och svagheter

Huvudfåran i sannolikhetsteori – såväl i Sverige som internationellt – är stokastiska processer, modeller för slumppåverkade fenomen som utvecklar sig i tid och rum, eller i mera komplexa strukturer i form av olika typer av träd och andra grafer, eller slumpmatriser. Klassiska starka svenska forskningsområden är extremvärdesteori, som studerar metoder att uppskatta risker, till exempel för extrema havsvågor eller finansiella sammanbrott, och populationsdynamik, som beskriver hur bestånd eller befolkningar tillväxer och dör ut. Båda områdena fortsätter att växa, genom framsteg inom teorin och motiverat av praktiska behov.

Partiella stokastiska differentialekvationer är ett annat område där svensk forskning de senaste åren förstärkts, med goda kontakter mot finansmatematik, bildanalys, numerisk analys och teoretisk biologi. Det förväntas få allt större betydelse i framtiden för att beskriva brusstörda fysikaliska system, bildsekvenser eller tidsutvecklingen av finansiella derivat. Ett annat svenskt forskningsområde är modeller för tungsvansade fördelningar, med finansiella tillämpningar.

Forskning om medicinska och biologiska problem har länge varit en viktig del av svensk statistisk metodutveckling. Under senare tid har detta område vuxit ytterligare genom omfattande forskning inom bioinformatik, systembiologi och biostatistik. Det blir allt vanligare, i olika typer av observationsstudier, att hantera data från patientregister som inte samlats in på ett slumpmässigt sätt. Bortfall av data och störande faktorer måste beaktas för att undvika systematiska fel vid uppskattning av en behandlingsmetods påverkan på sjukdom. Här har Sverige unika medicinska dataregister, och på senare tid har framgångsrik forskning inom kausal inferens och Bayesianska nätverk tillkommit. För kartläggning av genetiska riskfaktorer krävs i allmänhet högdimensionella datamängder. Svenska forskare har utvecklat flerstegsurval och andra datareducerande metoder, liksom korrigerande metoder vid testning av ett stort antal hypoteser, för att undvika massignifikans.

Ytterligare ett statistikområde i tillväxt är hantering av extrema finansiella risker, tillkommet genom skärpta myndighetskrav för banker och försäkringsbolag, där man med historiska data uppskattar osäkerheten för framtida utbetalningar i form av en fördelning. Ännu ett starkt svenskt statistiskt forskningsfält är bildbehandling och spatial statistik, där återsamlingsmetoder och partiella stokastiska differentialekvationer används som verktyg. Sverige har också internationellt framstående statistikforskning för partiellt observerade stokastiska processer. Nya modeller för smittspridning har utvecklats, där resultat inom sannolikheteori används för att bättre beskriva nätverk där vissa individer har många fler kontaktpartners än andra. Urvalsundersökningar och samlingsmetodik är ett annat traditionellt svenskt forskningsområde med fortsatt god aktivitet.

En svaghet som egentligen inte ligger så mycket i statistikämnet i sig, utan mer i vetenskapen som helhet, är det kunskapsgap som på många håll råder, där forskare i empiriska vetenskaper (alltifrån medicin och biologi till geo- och samhällsvetenskaper) använder statistiska metoder som är föråldrade i förhållande till statistikens spjutspetsforskning, eller direkt felaktiga. En rad studier har på senare år påvisat problemets omfattning, och det råder inget tvivel om att här finns en av de stora flaskhalsarna vad gäller produktion av tillförlitlig vetenskap. Statistiker på forskarnivå behöver finnas på plats i långt högre grad än idag bland forskare i andra vetenskapsområden. Detta är ett internationellt fenomen, men gäller lika mycket i Sverige. Vetenskapsrådets specialsatsning på statistik i empiriska vetenskaper är ett steg i rätt riktning, men står inte i proportion till problemets omfattning, och ytterligare satsningar behövs.

Vidare är den svenska statistiska forskningen fortfarande för liten inom områden inriktade på att hantera extremt stora datamängder – så kallad ”big data”. Forskningen inom grundläggande statistisk teori får också anses vara underrepresenterad i Sverige, exempelvis i jämförelse med andra nordiska länder.

## Trender, utvecklingslinjer och utvecklingspotential

”Big data” handlar om att datamängder av helt nya storleksordningar samlas in och skapas i en takt och omfattning som revolutionerar vetenskap, industri och samhälle. Datamängderna är mycket värdefulla, men också komplexa och ofullständiga. De väntar på att utnyttjas till landvinningar inom klimatvetenskap, energiforskning, biologi och medicin. De ger nya möjligheter att hantera risker i vårt alltmer komplicerade och sårbara samhälle. De har potential till utveckling av nya produkter och tjänster, och för att utveckla denna potential behöver de hanteras med statistiska metoder. Om 10 år kommer datatillväxten vara ännu mycket snabbare. En viktig del av framtida framgångar inom vetenskap, teknik och samhälle beror på hur vi lyckas hantera dessa data. Detta är den stora utmaningen för svensk forskning i sannolikheteori och statistik. Det gäller att finna ny förståelse för hur man bäst planerar gigantiska försök, finner mönster och strukturer i enorma datamängder, eller vilka metoder man ska använda för att hitta de guldgrubbor som är gömda i berg av siffror.

Utvecklingen av datorernas prestanda och datorprogrammets komplexitet gör att teoretisk analys och förståelse av resultaten ofta ligger långt efter. En viktig uppgift för sannolikheteori och statistik är att utnyttja

och vidareutveckla samarbete med datavetenskap. Det finns en mer än femtioårig statistisk tradition av multivariata metoder för hantering av högdimensionella data, icke-parametriska metoder med få modellantaganden, liksom metoder för inlärning med och utan övervakning genom diskriminant- och klusteranalys. Dessa utgör en grund för dagens moderna maskininlärningsmetoder och behöver fortsätta att utvecklas för de helt nya datamängder det är fråga om vad gäller storlek, insamlingssätt och struktur - ofta en kombination av datakällor av vitt skilda slag. Utan god statistisk förståelse är framstegen på datorområdet – den snabba hårdvaruutvecklingen liksom ny mjukvara och nya algoritmer – långt mindre användbara än vad de kunde vara. Det omvända gäller också: om statistiken inte förstår att rätt utnyttja datorernas nya möjligheter går den miste om mycket.

De nya utmaningarna kräver samarbete mellan forskare med olika kompetenser och intressen. Svensk forskning i sannolikhetsteori och statistik har de senaste 25 åren givit sig in i samarbeten med snart sagt all naturvetenskap och teknik, och med många olika industrier. För att resultat från forskningen, från hela världen, ska kunna göras snabbt och brett tillgänglig och använd behöver Sverige ha en framstående grundforskning inom sannolikhetsteori och statistik och en miljö där forskare har möjlighet att gå fram och tillbaka mellan grundforskning och tillämpad forskning. Omvänt måste tvärvetenskap och teknik befrukta och bidra till vitaliteten hos grundforskningen.

En trend inom sannolikhetsteorin är dess alltmer givande utbyte med analys och med andra grenar av matematiken. En annan är att diskret och kombinatorisk sannolikhetsteori inriktad mot nätverk och algoritmer är i tillväxt. Dessa trender är internationella, men är också tydligt manifesterade i Sverige.

I svensk universitetsorganisation har det ämne som benämns matematisk statistik länge fungerat som en framgångsrik brygga mellan sannolikhetsteorin och statistikteorin. Forskningen är idag så vidsträckt att delar av den flyttat över till ren matematik, numerisk analys och vissa av fysik- och teknikämnen. Denna utveckling är givetvis glädjande och visar på framgången hos det stokastiska synsättet. Samtidigt finns det skäl att fortsätta att värna om matematisk statistik för att behålla en kärna av grundforskning som både använder sig av sofistikerade sannolikhetsteoretiska och statistiska metoder, och samtidigt utförs i nära samarbete med tillämpningarna.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Sannolikhetsteorin har på ett par decennier kraftigt stärkt sin ställning som gren av matematiken, från att ha ansetts relativt perifer till att nu åtnjuta stor respekt, manifesterad exempelvis i att flera Fieldsmedaljer på senare går gått till gränsområdet mellan sannolikhetsteori och analys. Svensk forskning inom sannolikhetsteori har en mycket stark internationell ställning.

Statistiken har en stabil ställning som en grundpelare i vetenskaplig metod. Samtidigt håller stora delar av ämnet på att omformas, genom den explosiva ökningen av datamängder många tiopotenser större än vad som tidigare förekommit, vilket kräver nya metoder. Svenska forskare i statistik samarbetar intimt med många andra vetenskapsområden, men behovet av statistisk kompetens är näst intill omätligt.

För att statistiken ska kunna bidra fullt ut krävs fortsatt teoriutveckling. Ett område som särskilt behöver stärkas är statistisk teori för komplicerade och högdimensionell data. Detta inkluderar maskinlärning, och därvid är kontaktytorna med datavetenskap viktiga.

Kostnaden för att stödja forskning inom sannolikhetsteori och statistik är förhållandevis låg, och kan förväntas ge god avkastning. Svenska forskningsfinansiärer har tidigare inte varit tillräckligt bra på att stödja de samarbeten mellan statistiker och forskare i andra ämnen som ofta krävs för att åstadkomma empirisk vetenskap av god kvalitet. De senaste åren har detta förbättrats genom exempelvis Vetenskapsrådets strategiska satsning på sådana samarbeten. Trots detta behövs fler möjligheter för svensk statistik och sannolikhetsteori att söka bidrag för att utveckla sin egen vetenskap i den takt som behövs. Det finns annars en risk att mycket av forskningen fastnar i konsulteri och programapplikation, och kompetens som mödosamt byggts upp kan försvinna. I riskzonen är kompetensförsörjningen med nya forskare, tillgången på bred kunskap, och möjligheten att utveckla ny sannolikhetsteori och statistik för användning inom vetenskap och teknik.

I en nordisk eller internationell jämförelse går en mycket större andel av svenska forskares tid åt till undervisning och administration, och till att söka kortsiktiga bidrag. Detta gäller i speciellt hög grad de

matematiska vetenskaperna, inklusive sannolikhets teori och statistik. Detta är inte bara till nackdel för forskningen i stort, utan medför också problem för doktorandutbildning och nyrekrytering.

En viktig uppgift är att öka forskningstiden för etablerade forskare. Nyrekrytering och doktorandutbildning är viktig, men om de seniora forskarna inte hinner forska hjälper inte det. Utvecklingen mot större samarbeten och nödvändigheten av större engagemang i att utveckla livaktiga forskningsmiljöer understryker betydelsen av detta.

### Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Behov av nationella databaser och liknande infrastruktur är naturligare att hänföra till statistikens tillämpningsområden (medicinska, samhällsvetenskapliga, etc) än till själva statistikämnet. För sannolikhets teorin (men, som det sett ut hittills, i mindre grad statistiken) är Institut Mittag-Leffler en viktig infrastruktur på samma sätt som för matematiken i stort.

---

# MATERIALVETENSKAP

---

## Övergripande områdesbeskrivning

Materialvetenskap är ett vittomfattande område i gränslandet mellan fysik, kemi och teknik, som täcker in syntes och egenskaper hos material, samt dess tekniska tillämpningar. Material bidrar starkt till människans fortsatta välbefinnande och forskningsområdet är både stort och växande. Materialforskningen karakteriseras av starka kopplingar med näringslivet, och anknyter i allmänhet till framtidens utmaningar inom miljö, energi och hälsa. Svensk tillverkningsindustri är beroende av materialutveckling för att stärka sin internationella position.

Sambandet struktur – egenskaper är fundamentalt. Forskningsutmaningen är att förstå och manipulera den atomära/molekylära basen för materialegenskaper och att förbättra materialen genom nya metoder för syntes och bearbetning. Sverige har här en stark position något som återspeglas i att materialområdet tilldelats relativt många prestigefulla ERC senior grants. Det ligger i materialområdets natur att det betjänas av stora och tvärvetenskapliga grupper, varför Sverige behöver fortsätta satsa på starka forskningsmiljöer och införa forskarkonsortier mellan lärosäten.

Forskningen i halvledarmaterial och funktionella keramer är omfattande och framstående, med stark koppling till tillämpningar i nanoteknik, mikroelektronik och energilagring. Avancerade atomära och molekylära halvledarmaterial är nyckeln för att extrahera energi ur förnyelsebara källor och reducera energiförluster. Ett annat styrkeområde är utvecklingen av metoder för matematisk modellering, inte minst inom metallforskningen, men även inom keramiska material. Trenden är mot att studera multifunktionella material med ökande strukturell komplexitet (nanokompositer, hybridmaterial, mjuka material, legeringar). Särskilt framgångsrik inom polymera material är forskningen om nedbrytbara polymerer och biopolymerer, polymerers struktur och egenskaper samt framställning och karakterisering av polymerer för energi- och elektronikrelaterade applikationer. Även cellulosebaserade material, långtidsegenskaper och polymerers miljöinteraktioner är väl etablerade forskningsområden.

Stora utmaningar för keramiska och polymera material kommer att vara skräddarsydda funktionella material med specifika egenskaper för energi/elektronik, miljö, informations- och kommunikationsteknik samt medicinska applikationer. Att identifiera förnyelsebara startmaterial för uthållig materialutveckling är också en stor fråga, samt ersättning av strategiska element med begränsad naturlig tillgång eller där enskilda aktörer har kontroll över världsmarknaden. En annan är återvinning av material (materialens kretslopp).

Materialområdet utmärker sig genom behovet av tunga analysinstrument för karakterisering av material och ytor liksom även av högpresterande datorer. Det är viktigt att en god tillgång till stabila beräkningsresurser säkerställs. De förändrade förutsättningarna för finansiering av instrument ställer höga krav på universitetens strategiska styrning för att utveckla starka forskningsmiljöer. Materialforskarna är i hög grad beroende av infrastruktur av karaktären användarfacilitet för synkrotronljus (Max IV) och neutroner (ESS), datorkluster och elektronmikroskop. Vetenskapsrådet bör inkludera elektronmikroskopi i sin guide till infrastrukturen.

Projekt som är speciellt framåtblickande rörande nya material bör premieras av Vetenskapsrådet. Det är då önskvärt att projekten innehåller flertalet av elementen syntes, struktur/sammansättning, egenskaper, funktion samt modellering. Detta kan ses som ett riktmärke för god materialvetenskaplig forskning. En lämplig strategi kan också vara fundamental forskning på material efter längdskalor från det atomära till det makroskopiska, inklusive genomsökningar av materialdatabaser och prediktering/simulering.

## Halvledarmaterial, keramer och glaser

### Beskrivningen av forskningen inom ämnet

Ett material som leder elektrisk ström sämre än en ledare (metall), men bättre än en isolator kallas för halvledare. Halvledare är de basala materialen i de flesta moderna elektroniska apparater. Metaller, halvledare och isolatorer skiljer sig åt i hur ledningsbandets energinivåer ligger i förhållande till valensbandet. *Keramer* är

oorganiska material samtidigt som de är icke-metalliska och tillverkas gärna med lera eller andra mineraler som råmaterial. Ett exempel är betong. Till keramer räknas oorganiska föreningar mellan icke-metaller och andra element. Typiska sådana är oxider, nitrider och karbider. Keramer är kristallina – dvs de ingående atomerna är periodiskt utplacerade i rummet.

*Glas* kan ses som en smälta av oorganiskt material som har ”frusit” till en fast fas, men dock utan att forma en kristall. Atomerna intar oordnade positioner, till skillnad från det periodiska arrangemang som karakteriserar en kristall.

Fältet som sådant ligger inom vetenskapsområdet teknikvetenskaper, speciellt området materialvetenskap och har en stark koppling till områdena elektroteknik och teknisk fysik liksom till vetenskapsområdet naturvetenskaper, och då speciellt områdena fysik, kemi och geovetenskaper.

Forskningsutmaningen är att förstå och manipulera den atomära basen för materialegenskaper och hur man kan få materialen att fungera bättre genom nya metoder för syntes och bearbetning.

## Styrkor och svagheter

Material och ytteknik är allmänt erkända nyckelområden för Sveriges industriella styrka. Nya halvledare, keramer och glaser har avgörande betydelse för att flytta de teknologiska barriärerna framåt inom till exempel energi, miljö, information/kommunikations-, bygg- och verkstadsindustrin.

Svensk forskning i materialvetenskap domineras av halvledare och funktionella keramer. Tillämpningar inkluderar skärverktyg, vita lysdioder (LED), displayer, solceller, bränsleceller, katalys, lasrar, kullager, tribologiska material, röntgenspeglar, sensorer, MEMS, biologiska/medicinska markörer, processning av halvledare, etsning, epitaxi, maskning, magnetiska minnen, optiska beläggningar, mörkerseende kameror, smarta fönster och komponenter till elbilar. Forskningen skapar nya lösningar till energihushållningen (kraftverk, omvandling, överföring, användning). Forskning om nya keramiska och halvledarmaterial leder också till fundamentala framsteg inom energiomvandling och lagring. Detta kan leda till både billigare energi och lägre koldioxidbelastning. Här ingår bland annat elektroniska lysdioder och krafthalvledarmaterial, men också cement och tegel för byggsektorn. En utveckling sker inom geopolymerer (aluminiumsilikatbaserade keramer), vilka kan ersätta cement för en mera hållbar utveckling.

Omfattningen och spetsen på svensk forskning är god för halvledarmaterial och funktionella keramer. Sverige har flera starka forskningsmiljöer/grupper på området. Dessa arbetar tvärvetenskapligt och mellan olika universitet. Tack vare tidigare satsningar av Vetenskapsrådet och Knut och Alice Wallenbergs Stiftelse på medeldyr och dyrbar utrustning så har landet goda instrumentparker. Dessa kräver dock ständiga återinvesteringar. Tidigare var det vanligt att en forskargrupp hade tillgång till en instrumenttekniker. En förnyelse av den typen av stöd skulle kunna leda till att en forskargrupps apparatur kunde ges en mera unik prägel, vilket skulle kunna ge konkurrensfördelar vad beträffar forskningsresultat och publicering.

Avancerade halvledarmaterial är nyckeln till den viktiga utvecklingen av mikro- och nanoelektronik. Ett spännande och relativt nytt grundforskningsområde rör kvantprickar för halvledarstrukturer.

Dock finns en viss risk att komponenter utvecklas med grundämnen som inte finns tillgängliga i tillräcklig mängd. En viktig forskningsfråga är därför att utveckla alternativa material som är baserade på vanligt förekommande grundämnen och på så sätt undvika en internationell bristsituation för grundämnen/råvaror till strategiska komponenter i samhället.

Svensk forskning och utbildning på materialsyntesmetoder, strukturella keramer och glaser är eftersatt.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Material är strategiska i samhället, de omsätts fort, vilket ger industriella möjligheter. Framtida forskning lovar kunskapsbaserad design av avancerade och multifunktionella keramer. Ämnet kännetecknas av upptäckter och innovationer.

Följande internationella forskningstrender kan lyftas fram:

- Internationellt utvecklas syntesprocesser för material – både kemiska och fysikaliska – samt kontroller och styrning av dessa in situ. Här finns delar där Sverige sackar efter.



- Analysverktyg utvecklas för kristalldefekter/amorfhet, inte minst med avseende på dopning, diffusion och bildandet av mellanytsfaser. Exempel är Cs-korrigerad TEM, ToF-SIMS, solid-state-NMR, 3D-atom probe (tomografi);

- Avgörande framsteg sker inom modellering på flera storleks- och tidsplan; från Ab initio, via MC, MD till FEM.

Grafenprojektet (EU flagship project) har sin huvudnod placerad vid Chalmers. Det förefaller uppenbart att Sverige bör utnyttja detta och stödja verksamheter som angränsar till detta mycket omfattande och ambitiösa EU-projekt. Svenska forskargrupper var tidiga med att ta upp studier på grafen men forskningsfinansiering hade ett par års eftersläpning. Det är viktigt att beredningsgrupperna fångar upp projektansökningar kring nya material/fenomen.

En trend inom materialforskningen går idag mot att studera nanostrukturer och enkristaller av multifunktionella material ("butler"-material). Här finns också spännande möjligheter att gifta samman organiska och oorganiska material, exempel på detta är magnetiskt papper. En annan trend är att kombinera glas med betong som bärande byggmaterial i smarta hus. Däremot är grundforskning på syntesprocesser, strukturella keramer och glas något eftersatt. Man skulle här kunna önska en mera modelldriven syntesverksamhet.

Satsningar krävs på syntesmetoder med in situ-studier. Det handlar om atomlagerdeponering, kolloidsyntes, vakuumbörning, sintring, tejpgjutning samt exfolieringsmetoder. Riktade insatser krävs för studier av dopning och legeringseffekter samt analysteknik för diffusionsfenomen.

Högtrycksforskningen är internationellt livlig och det finns all anledning för Sverige att inom exempelvis materialområdet följa upp denna trend. Framtida forskning kan leda till överlägsna sintringprocesser, vilka även är relevanta för att förstå hur hårdmetall (våndskär) uppträder och i förlängningen även sedimentär bergartsbildning. Gemensamt är behovet av in situ hög-temperatur/tryckstudier. Ett parallellt forskningsområde är tejpgjutning för effektiv produktion i elektronikindustrin. Generellt gäller det bulk tillverkning av högkvalitativa enkristaller av material med extrema egenskaper, till exempel väldigt hög smältpunkt.

I ett framtida perspektiv för svensk kärnkraft kan kemiskt stabila bränslestavar av toriumkeramer förmodligen bli nyckeln till en fortsatt exploatering av atomenergi (fjärde generationens kärnkraft). I en sammanhållen beredskap för en sådan utveckling behövs en förtrogenhet med toriumkeramernas egenskaper. Därför kan det vara strategiskt lämpligt att Sverige redan nu upparbetar en kunskapsbas för denna typ av material.

Ofullständig och oklar tillgång till nödvändiga forskningsverktyg är ett växande problem efter regeringsbeslutet att ansvaret för finansiering av enskilda forskningsinstrument flyttas från forskningsfinansiärer (Vetenskapsrådet och Knut och Alice Wallenbergs Stiftelse) till universitet och högskolor (UoH). Detta är problematiskt eftersom UoH inte har på ett transparent sätt förmått att avsätta motsvarande medel för utrustning till enskilda forskare, och rektorerna gör inte enbart vetenskapliga prioriteringar.

Utforska nya koncept och integrera teori/simulering och visualisering, med experiment i moderna laboratorier. Det ligger i områdets natur att det betjänas av starka och tvärvetenskapliga grupper, varför Sverige uppmuntras att fortsätta satsa på starka forskningsmiljöer (till exempel Linnéstöd) och införa forskarkonsortier utan geografisk centring (jämför med den lyckade NUTEK-satsningen). Samtidigt behöver forskargrupperna snabbare ta sig an utmanande frågor från internationella materialupptäckter. Ett område som nu också blivit aktuellt är 3D och 4D imaging.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Svenska prioriteringar och institutioner för forskningsstöd är jämförbara med europeiska. Däremot är dock amerikansk och japansk forskningspolitik kraftfullare inte minst när det gäller material för energi, detta genom att prioritera strategisk grundforskning och att ha egna departement för energi. De kraftfulla kinesiska och koreanska satsningarna börjar få internationellt genomslag, något som kan utläsas av en starkt ökande publicering, även i de förnämsta internationella tidskrifterna. Den internationella konkurrensen hårdnar kraftigt.

Den internationella takten med vilken nya material och tillämpningar tillkommer är klart högre än den som svenska forskargrupper förmår hantera. Alltså behöver medel tillföras materialforskning. I en sådan expansion bör projekt som är speciellt framåtblickande premieras.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Utvecklingen av nya avancerade material kräver alltmer avancerade metoder. Internationellt är utvecklingen mycket snabb och materialområdet är starkt beroende av en nationell infrastruktur.

Under de kommande tio åren täcks genom MAX-IV och ESS mycket av behovet vad avser synkrotronljus och neutronstrålning. Det är dock viktigt att säkra att en livaktig materialforskning etableras kring MAX-IV genom byggande av dedikerade materialstrålrör. Även den internationella utvecklingen av röntgenlasrar är högtintressant för materialforskningen. För neutronstrålning genom ESS vore det strategiskt ändamålsenligt om svenska forskargrupper/företag tidigt kunde engagera sig för utvecklingen av faciliteten. Svenska forskare behöver under byggtiden också få tillgång till utländska neutronkällor och många yngre forskare lära sig tekniken.

Elektronmikroskopi är ett styrkeområde i vårt land. En koordinering av de större mikroskoperna i Sverige bör kraftigt övervägas.

Även datorkluster är i högsta grad något som skulle främja den teoretiska materialforskningen.

Efter att det nationella nätverket MYFAB för nanofabrikation har varit verksamt under en längre tid, kunde det nu vara lämpligt att göra en utvärdering. Här finns ett stort antal användare som har ett fortlöpande behov av uppgradering av labbutrustning.

## Metalliska material

### Ämnesbeskrivning

Metalliska material omfattar material som stål, aluminiumlegeringar, titanlegeringar och nickellegeringar. Generellt har dessa en kristallstruktur som ger mekanisk styrka och duktilitet (plastisk formbarhet). De har vanligen ett dominerande element och olika tillsatser av legeringsämnen som möjliggör värmebehandling och andra processer för design av mikrostrukturer med önskvärda egenskaper. Metallglaser (amorfa metaller) och nya material som högentropimaterial ingår också. Dessa bygger på helt andra legeringsprinciper och kan närmast räknas som multilegeringar. Vidare finns funktionella material som magnetiska material och minnesmetaller samt metalliska materials interaktion med t ex människokroppen.

Ytterst handlar metallforskning om att förstå hur struktur och egenskaper påverkas av materialsammansättning och yttre faktorer. Forskningen kan ha olika karaktär beroende på vilken del av kedjan tillverkning, struktur och egenskaper som adresseras. Tillverkning innefattar gjutning, plastisk bearbetning, värmebehandling och fogning (svetsning/lödning), pulverteknik samt även additiv teknik (metal printing).

Med struktur avses strukturelement från atomär nivå (kristalldefekter, och kristallstrukturer, nanostrukturer) via mesostrukturer till porer och sprickor. Dessa strukturelement, som uppkommer vid tillverkningen och förändras vid användning, bestämmer materialegenskaperna.

### Styrkor och svagheter

#### Styrkeområden

Forskningen under de senaste decennierna karakteriseras av utvecklingen av metoder att matematiskt modellera viktiga aspekter. Den svenska forskningen är här mycket stark och delvis världsledande.

Ab-initio-metoder för modellering baserade på densitetsfunktionalteori (DFT) har möjliggjort beräkning av stabilitet för icke-jämviktsfaser, gitterdefekter, staplingsfelsenergi och energier för gränssytor, men även kinetiska storheter som aktiveringsenergi. Aktiviteter finns vid flera lärosäten. Calphad-metoden kan tillämpas för att beskriva jämvikter och omvandlingar i komplexa legeringar. Verktygen Thermo-Calc och

DICTRA utvecklades vid KTH och finns över hela världen. Calphad-metoden vidareutvecklas och särskilt kombinationen av denna och ab-initio-metoder.

Atomsondstomografi gör att den kemiska sammansättningen kan mätas atom för atom, varvid tidiga stadier av utskilningsförlopp kan studeras. Elektronmikroskopi, särskilt diffraktion med bakåtspridda elektroner, möjliggör kartläggning av kristallografiska aspekter på mikronivå. Transmissionselektronmikroskopi med energifiltrering ger information om kemisk sammansättning på nanonivå.

Studier av korrosionsförlopp i olika miljöer har nya verktyg i form av olika sonder/mättekniker där elektrokemiska egenskaper kan mätas lokalt. Tribologiska egenskaper kan kopplas till metallytans struktur och egenskaper. Sverige har en stark tradition inom detta, koncentrerat vid ett fåtal lärosäten. Empiriska metoder kombineras med yt- och strukturkaraktisering. Teori/modellering tillförs. Betydande verksamhet inriktas mot tribologi hos tunna skikt på substrat. Sverige har en unik position inom pulverteknik med både teori/modellering samt material- och ytkaraktisering.

Universitetsforskningen inom metalliska material sker ofta i samverkan med industrin. Detta är inte alltid vanligt i ett internationellt perspektiv. Akademin kan därmed bedöma forskningens strategiska relevans bättre och industrin kan snabbt ta till sig ny kunskap. En fara är att forskningen kan bli kortsiktig. Rollfördelning och respekt för varandras drivkrafter är viktigt.

### Utvecklingsområden

Sverige hade under 60- och 70-talen en framskjuten plats när det gäller metallers mekaniska egenskaper. Forskningen inom detta område bedrivs idag vid ett antal lärosäten och hos ett forskningsinstitut. Man satsar på tekniker och metoder för att hantera komplexa termomekaniska förhållanden och komplexa lastsituationer, kopplingen mellan korrosion och deformationsförlopp samt t ex utmattning.

Forskningen om gjutna material och gjutprocesser är under utveckling i landet, och genom samverkan mellan högskola och forskningsinstitut har kritisk massa skapats inom fältet.

Metallers uppträdande vid strålning och användning av neutroner för deras karakterisering behöver byggas upp på nytt, i kombination med teori, i samband med satsningen på ESS.

Kunskapen om existerande metallers beteende i vissa processer är inte klarlagd, t ex vid smältning/stelning och materialsammansättningens inverkan på defektbildning. Detta gäller även för nya processer som additiv tillverkning där laser eller elektronstråle används för att smälta och bygga material lager för lager från en pulverbädd.

Möjligheter finns för metalliska material som magnetiska material baserat på bulkmetallglas eller funktionella/strukturella material baserat på intermetalliska material och/eller högentropimaterial.

### Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Trenden internationellt är att teori och experimentell karakterisering integreras över längd- och tidsskalor, från enskilda atomer till komponentnivå, samt från tider omfattande atomers vibrationer till livslängd hos tekniska system. Den teoretiska sidan av detta kallas ”integrated computational materials engineering”. För validering av beräkningsresultat behövs experimentella studier.

Synkrotronstrålning utnyttjas i allt högre utsträckning för materialkarakterisering. Särskilt för in-situ-studier av omvandlingsförlopp fås ny viktig information. Här är både diffraktionsstudier och ren strukturavbildning av intresse.

Möjligheter skapas via avancerade matematiska beräkningsmetoder som ab initio-approximationer, atomistiska beräkningar grundade på Monte Carlo- eller molekylärdynamik, till kontinuumbeskrivningar. Fasfältmetoden har generaliserats både till omvandlingar i fast fas och för att simulera deformation och spricktillväxt. Med förfinade metoder att förutsäga struktur på olika nivåer behövs motsvarande detaljinformation experimentellt. Teoriutvecklingen och den avancerade elektronmikroskopin tillsammans med spektroskopin går hand i hand. Materialprovning vid svenska universitet behöver därtill utvecklas för att svara upp mot denna trend.

Utvecklingen av beräkningsmetoderna tillsammans med framsteg i materialtillverkning som additiv tillverkning (metal printing) skapar förutsättningar till snabb materialutveckling, jfr ”Material Genom Initiative” i USA. Till detta skall läggas nya material som högentropilegeringar.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Metallforskningen i Sverige kännetecknas av hög klass inom både teori/modellering och experimentella metoder. Forskningen drivs vid flera forskargrupper och bygger på tillgång till relevant utrustning för materialkaraktisering, möjligheter till åtminstone inledande materialsyntes, viss användning av nationella anläggningar och framgångsrik tillämpning av teori/beräkningsteknik. Vetenskapsrådet stödjer forskning kring metalliska material inom materialvetenskap och teknisk mekanik. Andra finansiärer, primärt VINNOVA, men även Energimyndigheten och SSF/MISTRA/KK-stiftelsen svarar för relativt omfattande stöd till metallforskning. Exempelvis finns strategiska innovationsprogram som Metalliska material och Lighter (lättvikt) och kompetenscentra som Hero-M (VINNOVA), Biomatcell (VINNOVA) och HTC (Energimyndigheten).

Sett till olika forskargrupperns verksamhet i landet är forskningen i linje med den internationella forskningsfronten. Verksamheten inom teori och modellering är världsledande, speciellt när det gäller ab-initio-metoder och Calphad-metoden. Till detta skall läggas materialmekaniken och utvecklingen inom fasfältmodellering. Detta ger en bas för banbrytande forskning där längdskalor integreras och ger förutsättningar för flerskalemodellering. Sverige har från teknologisk synvinkel en stark position när det gäller området additiv teknik/metal printing och också viss forskning kring nya metalliska material (metallglaser och högentropimaterial).

Samverkan med universitet och forskningsinstitut i Europa är en viktig del i den svenska metallforskningen och svenska forskargrupper är attraktiva samarbetspartners. Ledande forskning bedrivs i USA, t ex ”Material Genom Initiative”, som syftar till att påskynda materialutvecklingen genom hantering av materialdata, strategier för att koppla teori med experiment för snabb utvärdering av alternativ, etc. Här bör även betonas utvecklingen i Asien med Japans traditionellt starka ställning inom materialforskning och där satsningarna i Kina gör den kinesiska materialforskningen alltmer konkurrenskraftig.

## Hot och möjligheter

De främsta hoten är att:

- Många projekt har för kort tidshorisont, vilket riskerar att leda till fel prioriteringar. Projekt på minst 4-5 år behövs för att etablera ett nytt fält.
- Kostnaden för doktorander och unga forskare är i internationell jämförelse relativt höga i Sverige.
- Möjligheter till materialsyntes inte har utvecklats i tillräcklig omfattning.

De främsta möjligheter är:

- Koppling av teori/modellering till avancerad materialkaraktisering, men även till nya möjligheter för framställning av nya material kan stärka utvecklingen.
- Yngre forskare bör uppmuntras till nationell samverkan inom profilområden. Exempel på sådana profilområden är experimentella metoder, teori/modellering, tillverkningstekniker (t ex additiv teknik), nya materialkoncept, etc.
- Anläggningar som ESS i Lund öppnar upp för materialkaraktisering som måste utnyttjas och kräver fortsatt kompetensuppbyggnad.
- Infrastruktur behöver samordnas när det gäller tillgång till avancerad mikroskopi, spektroskopi, syntes, etc. En samverkan likt mikroelektronikområdet (Myfab) tillför detta för enskilda forskare oavsett hemvist.
- Samverkan inom Europa är central och resurser finns via ERC och olika program. Lika viktigt är uppkopplingen till USA och Asien med strategiska samarbeten som stärker kvalitet och genomslag för svensk forskning.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Området teori/modellering har varit prioriterat. Det är viktigt att forskargrupper inom detta område har fortsatt tillgång till beräkningskapacitet.

Nationella anläggningar (MAX-lab, etc) och internationella satsningar (ESS, etc) skapar förutsättningar för unika experiment. Användningen behöver drivas på och spridas till fler forskargrupper.

Materialkaraktisering på nanometernivå (antingen i bulk eller på yta) har varit och är central för kunskapsutvecklingen. Till detta skall läggas möjligheten att mekaniskt prova material på olika sätt, vilket är en förutsättning för att verifiera/validera materialmodeller. En samlad nationell satsning/strategi behöver utvecklas av universitet och högskolor i samverkan med t.ex. Vetenskapsrådet för att säkerställa att styrkepositionen inte äventyras.

Bulkmetallglaser (BMG) och högentropimaterial kan innebära helt nya kombinationer av egenskaper och nya tekniker som additiv teknik (metal printing) öppnar upp helt ny framställning. Förutsättningar för denna forskning kan vara ett verktyg för att ta rejäla steg inom metallforskningen i landet.

## Polymera material och kompositer samt biomaterial

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Forskningen inom detta ämnesområde har oftast ett molekylärt perspektiv och anknyter i allmänhet till framtidens utmaningar inom miljö, energi och hälsa. Generellt omfattar forskningen syntes och modifiering av polymerer, karakterisering och modellering av fysikalisk-kemiska egenskaper, samt bearbetning, tillämpningar och miljömässiga aspekter. Forskningen är relativt bred och av olika karaktär beroende på vilka vetenskapliga frågeställningar som adresseras.

Samband mellan struktur och egenskaper är fundamentala eftersom olika tillämpningar ofta kräver vitt skilda kemiska och fysikaliska egenskaper. En speciell utmaning är därför att utveckla nya syntes- och bearbetningsmetoder för att kontrollera struktur och funktionalitet på olika längdskalor för att i sin tur kunna styra och kombinera olika materialegenskaper. Kompositer tillverkas genom tillsatser av fyllmedel, t ex oorganiska ämnen, kol eller cellulosa-fibrer, till polymera material för att skapa helt nya eller kraftigt förbättrade egenskaper. Viktiga frågeställningar rör t ex hur man kan styra fördelningen av fyllmedlet och åstadkomma tillräckligt god kompatibilitet mellan komponenterna. Polymera biomaterial kan fås att interagera med biologiska system med syfte att exempelvis behandla, förstärka eller ersätta vävnad eller hela organ. Frågeställningar omfattar t ex vävnadskompatibilitet och nedbrytbarhet i kombination med mekaniska egenskaper. På grund av ämnets karaktär har ofta även den grundläggande forskningen nära till tillämpningar. Industrier som tillverkar, bearbetar och hanterar polymerer har ett stort behov av avancerad kunskap och nya polymer material för sin internationella konkurrensförmåga.

### Styrkor och svagheter

Särskilt framgångsrik är svensk forskning inom nedbrytbara polymerer och biopolymerer, polymerers struktur och egenskaper inklusive modellering av till exempel polymera barriäregenskaper, dendritiska polymerer, biomaterial för vävnadsreparation, samt framställning och karakterisering av polymerer för energi- och elektronikerrelaterade applikationer, exempelvis polymerer som leder ström eller joner. Den svenska forskningen inom bearbetning av cellulosa-baserade material, långtidsegenskaper och polymerers miljöinteraktioner är också väl etablerad.

Svensk forskning inom polymera material, kompositer och biomaterial har under de senaste årtiondena kännetecknats av omfattande experimentell verksamhet, ofta i internationella samarbeten via t ex EU-projekt, och/eller i samverkan med industri och forskningsinstitut. På många ställen i landet finns institutioner (eller del av) som i huvudsak fokuserar på framställning, karakterisering och användning av polymera material, kompositer och/eller biopolymerer. Dessa grupperingar står sig mycket väl i ett internationellt perspektiv vilket utmärker sig genom omfattande publicering i högt rankade tidskrifter och genom att svenska forskare är

internationellt tongivande inom sina respektive forskningsområden. Inom svensk polymer- och biomaterialforskning koordineras stora internationella projekt och resultat överförs till kliniska och kommersiella tillämpningar. Polymera material och kompositmaterial används vid ytterligare avdelningar på flera universitet och också dessa står sig många gånger mycket väl i den internationella konkurrensen men då ofta i snävare, mer specialiserade områden.

Betydelsen av polymera material för svenska företag är avsevärd och akademiska forskningsledare samarbetar i stor utsträckning med näringslivet. Den generella trenden är att efterfrågan på akademiska samarbeten ökar, vilket kan ses som en konsekvens av att företagen har behov av kompetensutveckling. Till följd av detta initieras också nya forskningssamarbeten som vidgar Sveriges kompetensprofil inom ämnet.

Förnyelsen av forskningsområdet är påtaglig. Inte minst bidrar anpassningen till ett uthålligt samhälle, t ex genom omställningen av svensk massa- och pappersindustri eftersom nya forskningsfält har tillkommit i gränslandet mellan traditionell polymer- och skogsindustriell forskning. Vetenskapliga frågeställningar angående polymera material, kompositmaterial och biomaterial börjar också etablera sig inom det biokemiska området och i en mängd andra relaterade områden.

Centrumbildningar med huvudfokus på ämnet har tyvärr varit mycket begränsade. Den inomvetenskapliga kompetensen riskerar att urholkas genom att forskningsmiljöer blir underkritiska och av att de vetenskapliga frågeställningarna domineras av tvärvetenskaplighet. Ökad satsning på ämnet skulle också stärka de tvärvetenskapliga samarbetena. Forskningen inom ämnet är i stor utsträckning beroende av tillgången till en rad olika karakteriseringstekniker vilket kräver tillgång till många olika instrument med tillhörande kompetens. De förändrade förutsättningarna för denna typ av anslag ställer idag stora krav på lärosätenas strategiska styrning för att skapa, utveckla och bevara starka miljöer, vilket de ibland har svårt att leva upp till.

Max IV och ESS kommer att öppna nya och betydande möjligheter till forskning, t ex avancerade studier av olika nanostrukturerade material. Idag bedrivs mycket lite forskning inom ämnesområdet med anknytning till tekniker dessa ger upphov till vilket måste ses som en svaghet inför framtiden. Svagheter inom biomaterial gäller ofta en brist på koppling till viktiga kliniska utmaningar och biologiska utvärderingssystem, samt de begränsade aktiviteterna inom biopolymerfysik, mekanik och bearbetning och dess inverkan på det biologiska svaret. Doktorand- och postdoktoranställningar är relativt dyra i Sverige med avseende på forskningsbidragens storlek. Detta bidrar till att antalet postdoktorer på svenska universitet och högskolor avsevärt lägre än vad det är utomlands.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Ur ett globalt perspektiv ökar betydelsen av ämnesområdet. Det redan teknikintensiva samhället och ambitionerna att lösa de stora forskningsfrågorna ställer allt högre krav på tillgång på material med mycket specifika egenskaper. Här är de polymera materialen attraktiva eftersom de är förhållandevis lätta att framställa och bearbeta samtidigt som de oftast har avsevärt lägre densitet än keramiska eller metalliska alternativ. Dessutom kan materialen skräddarsys för att passa en definierad egenskapsprofil.

Utvecklingen av nya system för effektiv och miljövänlig lagring, omvandling och distribution av energi är central. Detta kommer att kräva nya polymera material för t ex batterier, bränsle- och solceller. Också forskning som är relaterad till människors hälsa kommer att vara av betydelse och dagens snabbt ökande förståelse inom biologin, inklusive genetik, öppnar nya möjligheter. Polymera biomaterial genomgår därmed en mycket snabb utveckling mot material som kan styra biologiska processer. På så sätt skapas t ex underlag för ny förbättrad diagnostik, leverans av aktiva substanser till mål som tidigare inte varit tillgängliga och regenerering i stället för reparation av skadad vävnad.

Framställningen av polymerer karakteriseras idag av en ökande grad av molekylär strukturkontroll. Detta genom att nya syntesmetoder utvecklas där atomer med mycket hög precision kan placeras i en särskild position i en polymer för att ge material med nya eller förfinade egenskaper, vilket kräver alltmer sofistikerade analystekniker.

För att göra polymera material, kompositmaterial och biomaterial till en självklar del av det uthålliga samhället kommer betydande forskningsinsatser att investeras i att söka förnyelsebara alternativ till oljebaserade material

under de närmaste årtiondena. Detta kräver samverkan med angränsande ämnen, till exempel med biokemi för att utnyttja produkter från bioraffinaderier eller fermentatorer för tillverkning av polymera material.

Med nanokompositer kan man redan vid mycket låga fyllmedelhalter uppnå oöverträffade egenskapsförbättringar. Den starka utvecklingen av nanokompositer kommer att fortsätta med t ex nya funktionella material baserade på olika kolbaserade material som grafen. Nationellt har stora satsningar gjorts på nanofibrillerad cellulosa som kommer att bidra till kompositforskningen vid flera högskolor. Återvinning av plast och kompositer utgör en stor utmaning.

Utvecklingspotentialen inom ämnesområdet är god. I takt med att användningen av dessa material ökar i betydelse så krävs också en alltmer fördjupad fundamental förståelse. De tvärvetenskapliga samarbetena har ökat högst avsevärt under de senaste 5–10 åren vilket har varit viktigt för områdets utveckling. I takt med att användningen av polymera material, kompositer och biopolymerer allt oftare sker i tillämpningsnära miljöer blir forskningsfrågorna allt mer tvärvetenskapliga vilket ofta bidrar till en positiv utveckling av de samverkande forskningsmiljöerna. Det framgångsrika, och välkomna, ökade inslaget av tvärvetenskaplighet kan också komma att utgöra det största hotet mot ämnet eftersom en konsekvens av detta kan bli att den inomvetenskapliga kompetensen urholkas.

Stora utmaningar för de närmaste 5–10 åren blir material för energi och elektronik, medicinska applikationer, skräddarsydda material med väldefinierade materialegenskaper, och att identifiera förnyelsebara råvaror för uthållig materialutveckling. Inom de flesta utmaningarna finns stor potential att utveckla material med nya funktioner, t ex biomaterial med molekylärt inbyggd information för att kunna styra biologiska processer. Gränslandet mellan detta ämne och livsvetenskaperna har stor potential. Runt om i världen finns ett antal mycket framgångsrika exempel på att det leder till mycket framgångsrika forskningssamarbeten. Den pågående nydaningen av svensk massa- och pappersindustri, vilket förenklat innebär omställning från stora volymer av enklare produkter till mer högvärdiga, kommer fortsatt att ge upphov till forskning av stor potential. Det finns också stor potential för framtida forskning med stark anknytning till ESS och Max IV, t ex genom att direkt koppla materialsyntes till tekniker som dessa möjliggör.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Ämnet polymera material och kompositer samt biomaterial har historiskt en relativt stark position i Sverige. Relevansen för samhället är stor eftersom användningen av dessa material är en förutsättning för den fortsatta utvecklingen av vårt teknikintensiva samhälle. Svenska företag behöver därför allt mer kompetens inom ämnet. Detta gäller bl. a. fordons-, färg/lack- och förpackningsindustrin, samt medicinsk industri.

I ett internationellt perspektiv är ämnets ställning mycket stark, speciellt material med anknytning till energi och hälsa. Den snabba tillväxten i Asien, särskilt den kraftfulla universitetssatsningen i Kina, ger stora avtryck på forskningsområdet. Forskningen sker i en kraftigt ökande internationell konkurrens och i en allt högre fart. Detta ställer ökande krav på flexibiliteten, organisationen och nivån på svensk forskningsfinansiering. På lite sikt kan annars de positioner som svensk forskning har inom ämnet undermineras.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Nya möjligheter till framställning av material med precisa strukturer och egenskaper ställer stora krav på avancerad karakterisering på olika längskalor. Detta kräver tillgång till relativt många medeldyra instrument i framför allt lokala centra. Det finns också ökat behov att kombinera tekniker för att studera och mäta struktur, dynamik och egenskaper simultant och som funktion av t ex temperatur, atmosfär, och att mäta materialegenskaper i komplexa system, t ex elektrokemiska och biologiska. Det är därför mycket viktigt att infrastrukturer (som t ex Max IV och ESS) anpassas till befintlig och framtida forskning inom ämnet.

---

# MEDICINSK TEKNIK

---

## Övergripande områdesbeskrivning

Ämnesområdet medicinsk teknik kan beskrivas som en teknik- och naturvetenskaplig disciplin för att lösa medicinska problem. Tekniska, fysikaliska, kemiska, biologiska och matematiska metoder används ofta i kombination för att ta fram nya metoder för diagnostik, övervakning och terapi. Medicinsk teknik är en egen vetenskap och är internationellt sett ekvivalent med *Biomedical Engineering*. Den är tvärvetenskaplig genom att området spänner över flera vetenskapsområden mellan teknik och medicin. Ämnesområdet har dock sin huvudtillhörighet inom teknikvetenskap.

Medicinsk teknik spelar idag en central roll inom vård och omsorg, och aktualiseras nu ytterligare av att vård- och omsorg står inför stora utmaningar. Dels genom ett större vårdbehov till följd av förbättrad hälso- och sjukvård och ökad livslängd, dels för att medborgarnas ökande medellivslängd medför ett stort proportionellt produktions- och intäktsbortfall. Totalt sett utgör kostnader för vård och hälsa en kraftigt växande andel av många länders BNP, däribland Sveriges.

Medicinsk teknik är ett av få verktyg som driver och möjliggör många och nödvändiga omställningar som krävs för att möta dessa utmaningar. Idag pågår också ett paradigmskifte i sjukvården där en allt större del av vården sker i och nära patientens hemmiljö och där sjukhusen blir allt mer högspecialiserade. Detta leder till nya möjligheter och utmaningar för svensk forskning.

En grundläggande förutsättning för Sveriges historiska framgångar inom medicinteknik har varit god samverkan mellan forskning, sjukvård och industri. Denna samverkan har hämmats under det senaste årtiondet men med en utökad satsning på forskning inom detta strategiskt viktiga område har Sverige stora möjligheter att nå en än mer framskjutande internationell position.

## Medicinsk teknik

### Beskrivningen av forskningen inom ämnet

Ämnesområdet medicinsk teknik är en teknik- och naturvetenskaplig disciplin för att lösa medicinska problem. Där används tekniska, biologiska, kemiska, fysikaliska och matematiska metoder för att ta fram nya metoder för medicinsk diagnostik, övervakning och terapi. Det har sin huvudtillhörighet inom teknikvetenskap, men forskningen här kräver relevanta kunskaper och etablerade nätverk också inom medicin. Det är detta som ger området dess speciella dimension. Teknikvetenskap, som i sig kan vara närbesläktat med medicinsk teknik, men saknar den medicinska dimensionen bör inte betecknas som medicinsk teknik. På liknande sätt tillhör inte medicinsk forskning som saknar teknikvetenskaplig forskningshöjd området.

Ämnesområdets stora bredd framgår genom en uppräknad av några av de ämnen/forskningsfält som identifierar sig här: Artificiella organ, bildgenererande teknik, biomaterial, biomedicinsk modellering, biomedicinsk optik, biomedicinsk sortertechnik, biomekanik, bionanoteknik, biomagnetism, elektrofysiologiska tekniker, fysiologisk mätteknik, medicinsk bildbehandling, medicinsk informatik, medicinsk mikrovågsteknik, medicinsk signalbehandling, medicinsk strålningsfysik, medicinsk ultraljudsteknik, talteknik, teknisk audiologi, mikrofluidik och ”tissue engineering” (vävnadsteknik), för att nämna några.

### Styrkor och svagheter

Sverige har ett antal mycket framgångsrika forskargrupper inom flera av de ovan uppräknade forskningsfälten. Vi har också internationellt framgångsrik forskning inom viktiga angränsande vetenskaper, såväl inom teknik som medicin. Svensk medicinteknisk industri är internationellt mycket framgångsrikt och genererar stora exportintäkter. Slutligen har vi en välorganiserad och framstående sjukvård med hög teknisk kompetens, och får därför sägas vara framgångsrikt, speciellt i förhållande till vår storlek.



Av demografiska skäl växer Sveriges sjukvårdskostnader snabbare än vår BNP, vilket inte är långsiktigt hållbart. Problematiken kan lösas bland annat med hjälp av en effektivare användning och nyutveckling av medicintekniska produkter. Den tekniska och demografiska utvecklingen medför att såväl hem- som primärsjukvården växer och att sjukhusen utvecklas mot alltmer högspecialiserade centra. Detta kommer att ställa höga krav på ämnesområdet.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Som redan nämnts, våra historiska framgångar inom medicinteknik har kunnat ske tack vare god samverkan mellan forskning, sjukvård och industri. Idag står dock vård och omsorg inför stora utmaningar med fokus på kortsiktig vårdproduktion och hantering av vårdköer. Den medicintekniska industrin agerar också på en global marknad med såväl forskningssamarbeten som kundrelationer. Forskningen inom området förefaller underfinansierad, sett både i relation till de forskningsbehov som kan identifieras och i ett internationellt perspektiv. Den ovan nämnda samverkan mellan forskning, sjukvård och industri, som är så viktig för den mer tillämpade forskningen, har därför hämmats under en lång tid.

För att vi skall behålla och stärka vår position, såväl industriellt som akademiskt behövs satsningar på tillämpad och grundvetenskaplig forskning. För den senare kommer Vetenskapsrådet in som en central aktör. Det är viktigt att notera att Sverige relativt sent fick en struktur till stöd för grundläggande medicinteknisk forskning, och en särskild beredningsgrupp för ämnet inrättades först 2004. Med tanke på det höga söktrycket har finansieringen hittills varit begränsad. Detta övergripande problem accentueras av att övriga finansiärers forskningsstöd (också industrinära sådant) till området är lågt. I ett fem- till tioårsperspektiv är bristen på forskningsstöd det största hotet mot hela vår medicintekniska forskning.

Ovan nämnda utveckling av vården, med ett kortsiktigt vårdproduktionsfokus, utgör inte bara en möjlighet men är också ett hot, inte bara för den medicintekniska forskningen men också för svensk industri som i ökad omfattning söker sig utomlands för samverkan. Starka, tillämpade projekt med hög innovationshöjd föds ur en god grundläggande forskning och detta är således på sikt en viktig förutsättning för detta strategiskt viktiga område. Sverige har då stora möjligheter att nå en än mer framskjutande internationell position, med potentiellt stora exportintäkter. Samtidigt bidrar detta till möjligheter att effektivisera vård och omsorg på ett långsiktigt hållbart sätt.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

I Sverige, liksom i resten av världen, pågår en omfattande global strukturomvandling inom läkemedelsindustrin. Detta hotar svensk forskning och svensk industri. Till skillnad från läkemedelsindustrin är den medicintekniska industrin i stark framväxt. Svenska företag sysselsätter här 20 000 personer och har 4% av världsmarknaden inom en bransch som växer med 7% om året och genererar stora exportintäkter. Ämnet medicinsk tekniks industriella ställning, såväl i Sverige som internationellt, är därför stark men bilden kan grumlans av ett alltför brett Life Science-begrepp, och de konsekvenser som det fått för t.ex. de strategiska forskningsområdena (SFO) och utlysningar hos statliga finansiärer.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Stora medicintekniska forskningsinfrastrukturer är framsprungna av behoven inom området. Exempelvis är 7T MR-projektet i Lund och NatMEG-projektet på Karolinska institutet nationella resurser för många forskargrupper på universitetssjukhus och medicinska fakulteter. Det finns heller ingen principiell motsättning mellan medicinsk forskning och medicinteknisk forskning. Tvärtom, här finns potentiellt stora synergier, men samverkan har historiskt hämmats genom att den medicintekniska forskningen i huvudsak bedrivits vid tekniska fakulteter och att de medicintekniska forskningsinfrastrukturerna utnyttjas framför allt av forskare vid medicinska fakulteter, och till en viss del på matematisk-naturvetenskapliga fakulteter (sjukhusfysiker). Ofta är dessa fakulteter dessutom placerade vid olika universitet. I framtida medicintekniska forskningsinfrastrukturer måste det därför finnas en tydlig och mer central roll för medicintekniska forskare.

## Övergripande områdesbeskrivning

Systemteknik är ett relativt ungt vetenskapligt område, som uppstått under det senaste halvsekle. Tillämpningarna har ett brett spektrum, från fordonsteknik och processindustri till telekommunikation och hälsovård. Systemtekniken syftar till att lyfta fram grundläggande gemensamma frågeställningar för att förstå hur en samling komponenter i ett tekniskt system kan samverka till en fungerande helhet. För detta utnyttjas teori och modeller från matematik och datalogi.

Ett systemtekniskt ämne som tidigt vann en stark ställning i Sverige är reglerteknik. Svensk forskning har starkt bidragit till att skapa en teoretisk grund för reglertekniken och är internationellt ledande på flera områden. Under senare år har tillgången på billiga komponenter för mätning, styrning, beräkningar och kommunikation öppnat för en rad nya reglertekniska tillämpningar, exempelvis inom energiteknik och medicinsk teknik. Reglertekniken har därmed blivit en nyckelteknologi för ett hållbart samhälle där resurser utnyttjas effektivt. Samtidigt ställer detta krav på ny teori för att hantera större informationsmängder och ökad komplexitet med bibehållna krav på precision, flexibilitet och säkerhet.

Ett angränsande ämne är kommunikationssystem, som nått internationella framgångar i synergi med svenska telekommunikationsföretag. En trend är att allt fler problemställningar inom kommunikationsämnet formuleras i ett nätverksperspektiv, snarare än i termer av länkar från sändare till mottagare. En annan stark trend är att gränserna till närliggande områden suddas ut och att de relevanta frågeställningarna blir allt mer komplexa. En systematisk och grundläggande förståelse för storskaliga system och växelverkan mellan dess beståndsdelar behövs. En annan viktig utmaning är allt högre ställda krav på kommunikationssäkerhet. Säker och robust trådlös kommunikation till en rimlig kostnad är en barriär mot industriell utbyggnad. För att möta dessa utmaningar krävs ytterligare gränsöverskridande grundforskning.

Signalbehandling handlar framför allt om att utvinna användbar information från uppmätta signaler. Ämnet har sitt ursprung i radarteknik och telekommunikation, men får allt större betydelse inom andra områden, såsom medicinsk teknik, energihushållning och trafiksäkerhet. För att långsiktigt säkerställa kvaliteten på forskningen inom ämnet behövs grundforskning i nära anslutning till tillämpad matematik, optimering och statistik. Till systemtekniken räknar vi också robotik och automation. Grundforskning inom detta område är av tvärvetenskaplig karaktär och har stor potential för svensk samhällsutveckling och arbetsmarknad: Svensk tillverkningsindustri omfattar enligt SCB cirka en halv miljon anställda. Därutöver finns stora förväntningar på framtida servicerobotar, exempelvis inom sjukvård och gruvarbete.

Systemteknisk grundforskning har sammanfattningsvis förutsättningar att generera resultat som får betydelse på en rad områden i vårt samhälle och gör det samtidigt möjligt att föra över idéer från ett tillämpningsområde till ett annat. Detta gäller såväl för utveckling av industriella produkter, som för infrastruktur, transporter och hälsovård. Forskningsinsatser för att hantera komplexitet och storskaliga problem med många växelverkande beståndsdelar är särskilt angelägna.

## Kommunikationssystem

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Ämnet kan grovt delas in i följande fält:

- Datatransmission (kodning, modulation, access-tekniker, resursallokering, interferenshantering, signalbehandling, detektions/estimeringsteori, flerantenn-tekniker, positionering);
- Mediaöverföring (kompression, kodning, signalrepresentation, mediatjänster);
- Kommunikationsnätverk (protokoll, mobila system, resursallokering, "routing", nätssäkerhet, arkitekturer, nätssystemens formgivning, nätshantering och teletrafikteknik);

- Kommunikationssystemteknik (övergripande system- och arkitektur aspekter, modellering och dimensionering).

De teoribildningar som väsentligen utgör grunden för ämnet är: kommunikations- och informationsteori, kodnings- och transmissionsteori, statistisk signalbehandling, kö- och trafikteori, grafteori, spelteori samt optimeringslära.

Definitionen av området kommunikationssystem som vi använder här relaterar främst till ämnesdiscipliner som i Vetenskapsrådets klassificering traditionellt sorterar under "signaler och system". Speciellt fokus är därmed på systemdesign och prestandaanalys, samt frågor kring modellering, analys, algoritmer, kodning, protokoll, arkitekturer och principer för överföring och lagring av information.

## Styrkor och svagheter

Området är väl etablerat i svensk industri och på de tekniska högskolorna. Svensk akademisk forskning inom området står sig i allmänhet mycket väl i en internationell jämförelse. Detta bekräftas till exempel via publikationer i högt renommerade tidskrifter, hur väl dessa publikationer citeras, samt svenska forskares synlighet. En annan styrka hos den svenska forskningen är att den täcker väl de ovan beskrivna fyra forskningsfälten. Sverige tillhör de ledande länderna i Europa, men internationellt dominerar USA. Kina och Korea är på kraftig frammarsch men har ännu inte satt ett tydligt internationellt avtryck i den akademiska forskningen.

Det bör poängteras att en fruktbar symbios mellan Ericsson, Televerket och svensk akademisk forskning ledde till att Sverige blev en dominerande nation i etablerandet och användandet av GSM- systemet. Det fundament som då byggdes, och de som examinerades inom området, har sedan varit av yttersta vikt även för de standarder som följt därefter (WCDMA och LTE). Ericssons existens och tillväxt har varit en förutsättning för expansionen inom området vid de tekniska högskolorna och det är troligt att svensk forskning inte varit lika framträdande utan Ericsson. Å andra sidan innebär även Ericssons dominans troligen en viss indirekt styrning av forskningsagendan.

Generellt sett är behovet av forskarutbildad personal stort i industrin. I takt med att kommunikationssystem blir alltmer avancerade och komplexa, krävs mer och djupare expertis. Ett stort hot mot svensk forskning inom kommunikationssystem, och inom ingenjörsvetenskap i allmänhet, är det bristande intresset hos unga att utbilda sig till ingenjörer. Specifikt har det under de senaste 15 åren blivit väsentligt svårare att rekrytera doktorander från de svenska ingenjörsutbildningarna. Under en tid vägdes detta upp av rekrytering från internationella masterprogram med undervisning på engelska. Sedan Sverige införde studieavgifter för icke-Europeiska studenter 2011 har dock denna rekryteringsbas minskat väsentligt och mycket av rekryteringen idag sker av studenter utan tidigare kontakt med Sverige.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Den akademiska forskningen inom området i Sverige fokuserar primärt på teori, algoritmer, metoder, principer och datorsimuleringar. Det finns även en viss experimentell verksamhet, men den är fragmenterad och bedrivs i de flesta fall i relativt liten skala. Viss testbäddsverksamhet är under utbyggnad, men mer omfattande testbäddsaktiviteter har hittills saknats, framförallt på grund av att det varit svårt att konkurrera om och finansiera den personal som krävs för att bygga och underhålla en framgångsrik experimentmiljö.

Några noterbara specifika trender inom området är följande:

- **Allt fler problemställningar formuleras i ett nätverksperspektiv.** Forskare inom datatransmission som traditionellt haft ett sändare/mottagare-perspektiv intresserar sig nu mer för interaktionen mellan flera noder i systemet. Studier av samverkan mellan olika protokollager blir också allt vanligare.
- **Gränserna till angränsande forskningsområden suddas ut.** Forskare och forskargrupper rör sig över gränserna och bidrar till olika områden, och interdisciplinära samarbeten formas. Speciellt tydlig är denna trend i överlappen mellan kommunikationssystem, signalbehandling, och reglerteknik; mellan kommunikationssystem och elektronik; samt mellan kommunikationssystem och data- och informationsvetenskap. Denna trend kan också ses i ljuset av att företag som till exempel ABB, Volvo och

Scania allt mer intresserar sig för kommunikationsteknik, speciellt trådlös kommunikation. Även små och medelstora företag bedriver avancerad forskning och utveckling. Inom tillverknings- och processindustrin finns stora vinster att hämta genom att ersätta kablar med trådlösa anslutningar, som möjliggör en reduktion av kostnader och en högre flexibilitet i konfigurationen av nya system.

- **Interdisciplinär integration av områden, såsom kommunikation, nätverk och reglering.** De trådlösa systemen och Internet börjar bli mogna tekniker när det gäller social kommunikation mellan människor, och direkt mellan datorer. Morgondagens utmaningar ligger i att integrera nya tillämpningar och samhällsliga funktioner som ställer helt andra krav, snarare än att förbättra prestandan i existerande tillämpningar. Nyckelbegrepp blir kommunikation mellan maskiner, i massiv skala, med återkoppling av sensorinformation för adaptivitet och styrning. Ett illustrerande exempel är automatisk trafikreglering av självstyrande bilar, vilket tydliggör helt nya och mycket utmanande krav på bland annat säkerhet, tillförlitlighet, ultralåg fördröjning, och distribuerade beräkningar.
- **Robusthet.** Det moderna samhället är beroende av robust infrastruktur för kommunikation, och robust trådlös kommunikation i synnerhet. Trådlös kommunikation är också en förutsättning för infrastruktskydd och tillämpningar såsom sensornätverk. Trådlös kommunikation är samtidigt känslig mot både avsiktliga och oavsiktliga störningar. Forskning som adresserar sårbarheten hos trådlösa kommunikationsnätverk förutses bli allt viktigare i framtiden.
- **Säkerhet.** En stor utmaning är att garantera säkerhet mot avlyssning, intrång, sabotage, och läckage av information. Allt eftersom kommunikationstekniken integreras bortom dagens sociala kommunikation mellan människor, så uppkommer ett flertal säkerhetsrelaterade problemställningar. Exempelvis så är dagens kommunikation mellan människor ofta inte särskilt känslig för läckor av privat information, eftersom vi ändå räknar med att andra har tillgång till t.ex. information vi laddar upp till sociala media. Situationen blir annorlunda när vi i framtiden har realtidsstyrning av t.ex. räddningsaktioner, och en mängd andra nya samhällsliga och industriella tillämpningar där känslig information cirkulerar i nätet.
- **Tillgång på stora mängder data ("big data").** "Big data" medför nya forskningsproblem och möjligheter. När saker, maskiner och människor blir allt mer uppkopplade så ökar möjligheten och kapaciteten för datainfång. Vi ser redan hur ett företag som Google kan samla in data baserat på vår användning av deras sökmotor, email-tjänst, och kartor. Under de kommande 10 åren kommer den potentiella mängden data fullkomligt explodera, i takt med att fysikaliska sensorer och annan informationsproducerande utrustning kopplas upp och länkas samman. Denna utveckling föder uppenbart nya möjligheter, men också risker. Distribuerade beräkningar, lagring, optimering och slutledning kommer bli stora framtida forskningsområden. Hantering och överföring av mycket stora datamängder är också teman som kommer behöva adresseras. Det finns också en stark koppling till säkerhet och robusthet.
- **Effekter p.g.a. icke-idealiteter i hårdvara och sensorer påverkar i allt större grad design av systemen.** Denna trend drivs bland annat av att allt högre frekvenser ska användas (mm-vågor), och att enklare (billigare) komponenter används. I många fall måste hårdvaran drivas nära gränserna för sin kapacitet, och effekterna av icke-idealiteter blir då påtagliga.
- **Energieffektivitet** är en annan trend, som drivs av ökade driftkostnader för IKT-system och av en önskan att reducera den globala förbrukningen av elektricitet. För att framtida Internet ska vara hållbart ur ett energiförbrukningsperspektiv kan inte energiförbrukningen skala linjärt med datatrafiken. Resurssnål trådlös kommunikation och fiberoptisk kommunikation är viktiga forskningsområden här.
- **Nya nätarkitekturer.** Arkitekturen för internet är inte fryst för all evighet utan det finns förslag såsom innehållscentriska nätverk och olika former av ad hoc infrastrukturfri trådlös kommunikation. Kopplat till detta finns nätsystemens formgivning. Det gäller till exempel routrar med adressuppslagning, lagringsnoder, routing och namnuppslagning. Här finns en dramatisk utveckling igenom "software defined networking" och virtualisering. **Molnteknik** utgör ett systemskifte som kräver ny forskning inom nätverksarkitekturer, speciellt då denna kopplas samman med mobila system.

De trender som beskrivits ovan och den kritiska massa av internationellt väl meriterade forskare som finns inom området i Sverige utgör en möjlighet. De delar av det svenska finansieringssystemet som använder internationell peer-review, speciellt Vetenskapsrådet, har goda förutsättningar att identifiera nya idéer och individer som har potential att nå stort genomslag internationellt.

En utmaning är att de relevanta frågeställningarna blir allt mer komplexa och forskning som ger stort genomslag kommer kräva genuint interdisciplinärt arbete. Till exempel, så har datatransmissionsforskningen har varit oerhört framgångsrik och systemen för till exempel mobilt bredband arbetar idag nära Shannons gränser, på länknivå. På systemnivå är de fundamentala gränserna till stora delar ännu ej kända. För att möta efterfrågan på högre kapacitet till lägre kostnad krävs en effektivare design av system och nätverk bestående av ett allt större antal sammankopplade enheter. Det krävs vidare forskning kring hur den uppstående komplexiteten ska hanteras, och hur dessa system ska optimeras. Vidare så behöver forskningen inom kommunikationssystem sammankopplas med kompletterande områden såsom tillämpad datavetenskap, distribuerade system och "high performance computing", nätverksarkitektur, och datorarkitektur med mera.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Svensk forskning inom ämnet är stark, heltäckande och internationellt konkurrenskraftig. En stark nationell industri har tillfört relevans och stimulans till forskningen såväl som vägar för nyttiggörande av resultat. Alla de stora tekniska högskolorna och universiteten har betydande verksamhet inom området.

Ett flertal nya trender kan identifieras, bland annat: allt fler problemställningar formuleras i ett nätverksperspektiv; gränserna till angränsande forskningsområden suddas ut; mycket forskning adresserar modellering och kompensation av icke-idealiteter hos hårdvara; och forskning kring ökad robusthet och säkerhet har hamnat i ökat fokus. Tillgången på stora mängder data ("big data") leder också till nya problemställningar och möjligheter.

Ett väsentligt hot är det bristande intresset hos unga att utbilda sig till ingenjörer. Specifikt så har detta även minskat rekryteringsbasen till forskarutbildningen.

En utmaning är att de relevanta frågeställningarna blir allt mer komplexa. En viktig delutmaning är att förstå hur stora, komplexa system ska optimeras för olika prestandamått, såsom datatakt, robusthet, flexibilitet, spektraleffektivitet och energi-effektivitet. En annan viktig utmaning är allt högre ställda krav på säkerhet och robusthet, speciellt i industriella och samhällskritiska tillämpningar. För att möta dessa utmaningar krävs ytterligare gränsöverskridande forskning.

### Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Forskning i kommunikationssystem är beräkningsintensivt och gynnas av tillgång till nationella beräknings- och superdatorcentrum med hög kapacitet och relevant mjukvara.

## Reglerteknik

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Reglerteknikens syfte är att formulera principer som gör det möjligt att styra tekniska system. Den mest grundläggande är återkoppling, vilket innebär att mätsignaler från en process används för att räkna ut värdet på styrsignaler med vilka processen påverkas. På så sätt kan man minska störningskänsligheten i processen och drastiskt förbättra prestanda, men också riskera problem, till exempel instabilitet. Reglerteknik omfattar hela kedjan från att formulera tekniska krav och konstruera en matematisk modell, till att utforma algoritmer för beräkning av styrsignaler, samt att implementera och verifiera. Mätteknik och komponenter ingår inte, men framgångsrikt utnyttjande av reglerteknik förutsätter kunskap om dessa ämnen, liksom om datalogi och angränsande systemtekniska ämnen.

Det är välkänt att återkoppling kan förändra de dynamiska egenskaperna i en process. För att säkerställa goda dynamiska prestanda utnyttjar reglertekniken matematiska modeller, ofta hämtade från andra discipliner, som anpassas för att analysera återkopplingens dynamiska effekter. Kopplingen till matematik, särskilt dynamiska system, optimeringslära, och matematisk statistik, är därför stark. På samma sätt finns starka kopplingar till datavetenskap, särskilt realtidsprogrammering, eftersom datorer som utnyttjas för reglerteknik måste programmeras med särskild hänsyn tagen till effekten av tidsfördröjningar mellan mätning och

styråtgärder. Sammanfattningsvis kan man säga att reglerteknik är ett gränsöverskridande systemtekniskt basämne, som betonar helhetsegenskaper då flera delsystem kopplas samman.

Under senare år har tillgången på effektivare och billigare komponenter för mätning, styrning, beräkningar och kommunikation öppnat upp för en rad nya reglertekniska tillämpningar, exempelvis inom energiteknik och medicinsk teknik. Detta ställer krav på ny teori för att hantera större informationsmängder med bibehållna krav på prestanda, flexibilitet och säkerhet. Betydande forskningsinsatser inom reglerteknisk teori och metodik behövs för att säkerställa funktion och säkerhet i alltmer komplexa tekniska system. Sådana system utvecklas i snabb takt och reglertekniken har därmed blivit en nyckelteknologi inom en rad industriella näringar liksom i ansträngningarna att skapa ett hållbart samhälle där resurser utnyttjas effektivt. Svensk reglerteknisk forskning har mycket stora förutsättningar att även i framtiden spela en internationellt ledande roll inom teknikutvecklingen i samhället.

## Styrkor och svagheter

Grunden för svensk akademisk forskning i reglerteknik lades på 1960-talet, då professurer i ämnet tillsattes samtidigt som datoriserade styrsystem introducerades i processindustrin. Svensk forskning vann snart internationellt erkännande och bedriver idag världsledande forskning inom flera områden. Detta gäller exempelvis inom teori för optimering av dynamiska system samt reglering av och över nätverk.

Ett annat område är *modellering* av dynamiska processer för reglertekniska ändamål. Konstruktion av dynamiska modeller baserat på uppmätta data för signaler och utsignaler kallas allmänt för systemidentifiering. Svenska artiklar, läroböcker och programvarupaket för systemidentifiering har fått stor internationell spridning. Även matematiska modeller baserade på fysikaliska principer används flitigt i reglerteknik. För att bygga sådana modeller i stor skala behövs också datorverktyg. Svenska forskare inom reglerteknik och datavetenskap har varit drivande i utvecklingen av modelleringsspråket Modelica och tillhörande verktyg.

Trots Sveriges internationellt starka ställning inom reglertekniken finns också områden inom ämnet som fått mindre utrymme i vårt land. Ett sådant är gränsområdet mellan reglerteknik och *systembiologi*. Detta ämne handlar om att förstå hur naturen löser de reglertekniska problemen som garanterar funktionen hos en levande organism. Området har vuxit snabbt internationellt och utgör numera ett betydande inslag på reglertekniska konferenser.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Konvex *optimering*, särskilt semidefinit programmering, under de sista tjugo åren etablerat sig som ett standardverktyg för analys och syntes av reglersystem. Svenska forskare har varit föregångare genom att utveckla metoder för robust reglering, analys av hybrida system och dynamisk programmering med hjälp av sådana verktyg. YALMIP är ett svensktutvecklat datorverktyg för avancerad modellering och lösning av optimeringsproblem, som har fått en stor internationell spridning. En viktig gren av forskningen behandlar optimering i realtid, vilket betyder att styrsignalerna inte optimeras i förväg, utan kontinuerligt uppdateras med hjälp av optimeringsalgoritmer, allteftersom nya mätningar samlas in. Ett annat område som har revolutionerat av konvex optimering är möjligheten att lösa mycket stora estimeringsproblem med struktur såsom gleshet eller matriser med låg rang.

På senare år har uppmärksamheten riktats mot så kallad *distribuerad reglering*, vilket innebär att många styrenheter samtidigt bidrar till att styra olika delar av en komplex process. Eftersom alla mätningar inte blir tillgängliga överallt samtidigt blir det en utmaning att se till att styrenheterna samverkar optimalt, snarare än att störa varandra. Forskning inom detta område har kopplingar till både spelteori och distribuerad optimering. Komplexiteten i problemen kräver lösningar med god skalbarhet.

Återkoppling via *trådlösa nätverk* är en lovande teknik med många tillämpningar tack vare att dyra kabeldragningar på så sätt kan undvikas och underhållet förenklas. Trådlös kommunikation har dock nackdelen att datapaket kan bli fördröjda eller borttappade, vilket kräver nya metoder för analys, simulering och design. Svenska forskare är starka på detta område, delvis tack vare stimulerande samarbeten svensk telekom-industri.

Till exempel bygger framtidens transportsystem troligtvis på trådlös kommunikation mellan fordon för samverkande reglering.

Datorer byggs in i avancerade tekniska produkter för att övervaka och styra funktionalitet. Detta kallas *inbyggda system*. Svensk industri inom området har gynnats av Sveriges starka ställning som forskarnation inom systemtekniska ämnen. Forskningen om inbyggda system har hittills huvudsakligen haft tillämpningskaraktär, men grundforskningsaspekter blir allt viktigare i takt med att enheterna växer i antal och komplexitet. Ett närliggande område med stor potential är *autonoma system*. Med detta menas ett tekniskt system som självständigt kan lösa vissa uppgifter. Självkörande bilar finns redan i prototypstadiet, och man kan redan nu köpa bilar med mycket intelligenta hjälpfunktioner. Reglerteknik är en förutsättning för denna snabba utveckling.

Mycket av utvecklingen av reglerteknik har historiskt skett i nära samarbete med svensk processindustri. Forskningen inom området processreglering har haft en minskad utveckling internationellt de senaste femton åren, men nya forskningsinsatser krävs för att möta kraven från framtidens processindustri.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Det systemtekniska forskningsfältet genomgår en snabb utveckling, vilket gör att gränserna mellan ämnen är i ständig rörelse. Internationellt sett har den tillämpningsdrivna forskningen inom reglerteknik vuxit de sista 20 åren. Grundforskningen inom ämnet har samtidigt utvecklat problemformuleringar som delvis överlappar med andra systemtekniska ämnen. Dessa trender skulle potentiellt kunna försvaga reglerteknikämnets identitet, om forskare på vissa håll känner större samhörighet med sina kollegor i ett tillämpningsområde än med sina reglerteknikkollegor. Å andra sidan har utvecklingen i någon mån gynnats svenska forskargrupper, eftersom svensk reglerteknik har en lång tradition av samverkan över ämnesgränser, både mot tillämpningar och mot närliggande teoriämnen.

Möjligheterna till en fortsatt stark utveckling av svensk reglerteknisk forskning är stora. Allt fler sektorer av industri och samhälle är beroende av återkopplad styrning via dator- och kommunikationssystem för att fungera effektivt och flexibelt. Inte minst gäller detta framtidens lösningar för energi, miljö, transport och sjukvård. Grundforskning inom reglerteknik behövs för att formulera metoder som kan hantera komplexiteten i dessa system på ett effektivt sätt. Metoderna baseras på matematiska modeller och ett systemtekniskt helhetsperspektiv.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Den experimentella delen av reglerteknik görs normalt i samarbete med industri eller andra forskningsprojektpartners, och bestäms då av tillämpningen och inte av teorin.

Infrastrukturer för tunga beräkningar används inom reglerteknik för, till exempel, optimering och verifiering. Ett relativt nytt forskningsområde är molnteknologi för reglerteknik. Det är viktigt att forskare i reglerteknik i ett tidigt skede är med i utvecklingen ”test-beds” för svensk e-infrastruktur, eftersom realtidskraven för reglerteknik är speciellt hårda.

## Robotik och automation

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Området robotik och automation är ett mycket brett och tvärvetenskapligt forskningsområde. Mycket handlar om att integrera kunskap från många olika vetenskapliga discipliner; tekniska såväl som beteendevetenskapliga. Robotik kan delas upp i delområden som industrirobotik, fältrobotik, servicerobotik, kognitiv robotik, autonom robotik och humanoid robotik. Den gemensamma nämnaren för robotik och automation har sitt ursprung i att effektivisera mekanisk tillverkning, men idag finns stora etablerade tillämpningsområden även inom processindustri och energi samt robotkirurgi med framtida tillämpningar som hälsa, sjukvård och servicerobotar

i hemmet. Automation har idag en vidare betydelse, som även omfattar logistik, produktionsplanering och schemaläggning.

International Society of Automation har i sin standard ISA95 beskrivit den funktionella hierarkin i en tillverkningsprocess i tre olika nivåer: (i) affärsplanering och logistik; (ii) produktionsplanering och schemaläggning; (iii) styrning av satsvis tillverkning, kontinuerlig reglering och sekvensstyrning. Det som utmärker de olika nivåerna i denna hierarki är framför allt tidsskalan; från dagar upp till år på den översta nivån, medan mellannivån typiskt har en tidsskala på timmar. På den mest processnära nivån styrs signaler för tryck, flöden, och motorer med tidsskala på sekund eller millisekund. Den funktionella hierarkin i en produktionsprocess är giltig oavsett industrigren. Robotik och automation som ämnen är synnerligen multidisciplinära med matematisk modellering som väsentligt inslag. För att analysera automation behöver man använda metoder från forskningsområden såsom reglerteknik, datalogi, signalbehandling, kommunikation, optimering, matematisk statistik. Dessa behövs också för syntes av ett automationssystem. För implementering behövs kunskap inom områden som instrumentering, elektronik, elektriska drivsystem, datalogi (nb. realtidssystem, databaser), visualisering, datorkommunikation och ergonomi.

Den vetenskapliga kärnan i robotik och automation är syntes av automationssystem samt matematisk modellering för modell-baserad styrning. Denna kräver kunskaper inom fysik, mekanik, kemi, elektronik samt programvara. Historiskt är robotik en del av automation, mer inriktad på industriella uppgifter som montering, svetsning, bearbetning, målning och materialhantering. Förutom de generella automationsämnen, som nämnts tidigare, kombinerar robotik även ämnen som mekanik, elektronik, reglerteknik, robotseende, datalogi, artificiell intelligens, kognition och språkteknologi. Ofta omnämns integrationen av mekanik, elektronik och mjukvara som mekatronik.

## Styrkor och svagheter

Inom ABB nyutvecklas en två-armad robot (ABB Dual-Arm Concept Robot (DACR); tidigare FRIDA), och simuleringsmjukvaran RobotStudio vidareutvecklas. De nya koncepten har på flera sätt stimulerats av världsledande forskning i samverkan med akademien. Andra nyskapande aktiviteter inom svenska ABB riktas mot standardisering inom industrirobotik, i synnerhet inom säkerhet med pågående verksamhet mot kollaborativa robotar (ISO/TS 15066 – Safety of Collaborative Robots). Grundforskning inom robotik har på senare år hämmats av att den nationella forskningsfinansieringen varit starkt begränsad, särskilt efter att SSFs ProViking avslutats. Även den EU-finansierade forskningen går i riktning mot innovationsdriven forskning, medan grundläggande forskning och tvärvetenskaplig förnyelse har blivit eftersatta.

Grundforskning inom svensk robotik är fragmenterad, något som betingas av frånvaron av statlig forskningsstrategi. Den grundforskning som genomförs av de mest framstående forskningsgrupperna, sker ofta i robotikens randområden till andra discipliner. Några sådana exempel är kognitionsforskning, robotstyrning och adaptiv reglering, robotseende, objektmanipulation, optimering och formella metoder för automation. Vissa grundforskningsområden såsom humanoidrobotik är obefintligt eller knappt företrädda.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

### Ökad robotik- & automationsforskning krävs för att behålla industrin i Sverige

Robotik och automation är i stark tillväxt internationellt. Speciellt hos oss i västvärlden är en alltmer ökad grad av automation nyckeln för att kunna behålla tillverkning, så att den inte flyttar till lågkostnadsländer. Sveriges ekonomi är fortfarande i mycket hög grad beroende av tillverkningsindustrin. Det visar sig tydligt om man studerar statistik tillgänglig på Statistiska Centralbyrån ([www.scb.se](http://www.scb.se)). År 2013 uppgick den totala svenska varuexporten till 1091 miljarder kronor. Därav stod verkstadsindustri och processindustri för mer än 50 %. På samma sätt anger SCB, att av totalt 2.8 miljoner sysselsatta i privat sektor andra kvartalet 2010 var totalt drygt en halv miljon anställda i tillverkningsindustrin. Med det relativt höga löneläge, som Sverige har, krävs en fortsatt ökande grad av automation för att kunna behålla tillverkningen i landet utan utflyttning eller nedläggning. För detta krävs forskning och utveckling inom landets gränser. Vi kan inte upprätthålla vår



position genom att enbart leva på importerad teknik. Idag är fortfarande stora delar av vår tillverknings- och processindustri långt framme i automatisering, men utvecklingstakten har stannat av väsentligt jämfört med för 30 år sedan. Man förlitar sig i hög grad på leverantörsföretagen.

Den framtida tillväxten inom robotik ligger i hög grad utanför fordonsindustrin. Detta gäller för såväl industrirobotar som servicerobotar. Utmaningen för Sverige ligger i att etablera en stark position inom servicerobotiken för professionella användare. Flertalet av dessa kräver autonom mobilitet. Exempel är robotar för materialtransporter på sjukhus, spanings/övervakningsrobotar och förarlösa gruvfordon. Sverige har stolta traditioner, när det gäller att utveckla komplexa tekniska system, exempelvis telekommunikation, flygplan och kärnkraft. På 1990-talet finansierade NUTEK programmet Komplexa Tekniska System med några projekt inriktade mot robotiserad tillverkning och processindustri. Dock har vi först idag de informationsteknologiska hjälpmedlen för att kunna integrera större andelar av automationshierarkin. Ökad datorkraft tillsammans med dagens minneskapacitet, överföringshastigheter och molntjänster öppnar helt andra möjligheter att integrera de delar av automationshierarkin, som hittills varit åtskilda. Även inom optimering har det gjorts stora framsteg för lösning av optimeringsproblem, som man tidigare bara kunde formulera matematiskt.

Viktiga grundforskningskrävande utmaningar i robotik finns inom småföretagens automation, som innefattar många olösta och negligerade problem. Skillnaden ligger i robotsystemens modularitet och anpassningsbarhet, så att småföretagens produktionstekniker kan integrera utrustningen och konfigurera för maximal produktivitet, utan att hela systemet kommer från en leverantör. Att lösa småföretagens problem kan också vara det bästa sättet att nyorientera forskning och problemformuleringar inom servicerobotik. Affärsmissiga och ansvarsmässiga överväganden måste beaktas på alla nivåer med undvikande av övertro på standardisering.

Inför framtiden står vi inför flera andra stora grundforskningskrävande utmaningar:

- Modellering är en tidskrävande och komplicerad del av automation, och den kräver nya metoder för att snabbare ta fram modeller med rätt komplexitet;
- Användningen av matematisk optimering ökar hela tiden på alla nivåer, och den kommer att kräva nya algoritmer för robust optimering och modell-baserad distribuerad optimering;
- Automationssystem bygger alltmer på standardoperativsystem som Windows och kopplas ihop med kontorsnätverket, men de måste ändå ha bibehållen tillförlitlighet, datasäkerhet och realtidsprestanda;
- Framtidens utmaningar inom energi- och miljöområdet kommer att göra, att behoven av automation och flexibilitet för energi- och resurshantering ökar dramatiskt under de närmaste decennierna;
- De olika nivåerna i automationshierarkin kommer att integreras alltmer, vilket kommer att kräva en mera strukturerad, holistisk och distribuerad syn på automation;
- Den ökande tillgången till stora datamängder ger nya möjligheter till att söka information ("Google för automation") och att analysera och upptäcka onormala situationer;
- I framtiden kommer industrirobotar allt oftare att arbeta sida vid sida med människor, vilket kräver human-robot-interaktion (HRI) och ett helt annat säkerhetstänkande än, när roboten står i en inhägnad cell;
- Hantering av osäkerheter och tidsvariabilitet i robotarbetsfältet och dynamiska omgivningar via adaptation och lärlärdhet; Hur förstår en operatör vad en lärande robot kommer att göra? Rörelsesyntes under osäkerhet?
- Forskningsutmaningarna för servicerobotar och självkörande fordon är många och nya jämfört med traditionella industrirobotar, främst autonom förmåga, förmåga att navigera och uppnå destinationer i dynamiska omgivningar med människor och andra hinder;
- Robotsinnen och exteroception kombinerad med kognition behövs för högnivåperception och reaktiv styrning.

Dessa utmaningar kräver grundforskningsframsteg inom robotikrelevant rörelsestyrning, optimering, exteroception, perception, kognition, kognitiv HRI, autonoma system, lärlärdhet, jämte systemarkitekturer för distribuerad perception, kognition och aktion.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Den svenska tillverknings- och processindustrin var tidigt ute med att automatisera produktionen. Redan på 1960-talet installerades den första datorstyrningen av ett pappersbruk (Billerud AB, Gruvöns Bruk), och den första Unimate-industriroboten installerades på Metallverken, Upplands Väsby, år 1967. ASEA introducerade

den första elektriska mikroprocessor-styrda industriroboten IRB6 år 1973. Denna tidiga utveckling gynnades av, att vi även hade starka utvecklingsavdelningar inom leverantörsföretag. För processregleringen fanns på 1960-talet IBM:s nordiska laboratorium, som drev projektet på Gruvön. Därefter togs den ledande rollen över av ASEA, som introducerade sitt första distribuerade styrsystem ASEA Master 1983. Utvecklingen gynnades också av stark forskning i angränsande områden som reglerteknik, och de flesta svenska automationsforskare är också reglertekniker i botten. Det fanns också redan på 1970-talet robotforskning både på KTH och på LiU, medan forskning i automation kom senare. De första professurerna i robotteknik och industriell automation tillkom i Lund 1987, därefter på Chalmers. Det har funnits professurer inom ämnet mekatronik sedan 1996, och samma år startade även den första samlade satsningen mot robotik vid Centrum för Autonoma System på KTH. Civilingenjörprogram i automation och mekatronik finns på Chalmers. Civilingenjörprogram i robotik finns på UU och MDH, masterprogram på KTH och ett magistersprogram på HV. Huvuddelen av robotforskningen på de tekniska högskolorna sker dock fortfarande inom angränsande ämnesområden som reglerteknik, datalogi och maskinteknik. Det finns större robotiklaboratorier många svenska lärosäten. Sedan 2010 finns branschorganisationen Svensk Automation. År 2013 etablerades ett svenskt kapitel av IEEE Robotics & Automation Society, och världens största robotikkonferens ICRA kommer att hållas i Stockholm 2016. År 2015 organiseras den näst största automationskonferensen CASE i Göteborg.

Internationellt har ämnet en stark utveckling såväl vetenskapligt, akademiskt som industriellt. Utöver att vara den största robotmarknaden har Asien (nb. Japan, Korea, Singapore, Taiwan, Hong Kong, Kina) också bland de största och bäst organiserade forskningsprogrammen i robotik. Koreas årliga budget för robotikforskning är mer än M\$70 och därtill kommer robotlandprojekten i Incheon och Masan. Kina växer starkt.

Europeiska Kommissionen (EC) finansierade i sjunde ramprogrammet 130 robotikprojekt med M€536. Det nya EC-ramprogrammet H2020 har en robotikforskningsbudget på M€1000 över fem år. I Europa utgör euRobotics en nätverksorganisation för akademisk och industriell robotik föregången av EURON och EUROP.

## Forskningsinfrastruktur

Forskning i robotik och automation är inte beroende av nationell forskningsinfrastruktur.

## Signalbehandling

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Signalbehandling är ett tillämpningsdrivet ämne, med rötter inom audio, kommunikation, och radar. Ämnet har på senare tid utvecklats till en metodvetenskap med en omfattande verktygslåda. Signalbehandling är en möjliggörande teknik inom en lång rad av ämnesområden och en naturlig del i de flesta moderna IT-system. Den fjärde generationens mobiltelefonisystem (LTE), trådlösa (sensor) nätverk för olika tillämpningar, infotainment- och säkerhetsystem i bilar och olika GPS-baserade system för navigering är några exempel där signalbehandling är en nyckelkomponent.

Avancerad signalbehandling används också i smarta mobiler och surfplattor. Bättre och billigare hårdvara och flexibla programmeringsmiljöer för så kallade "appar" öppnar upp för nya mätplattformar och tillämpningar inom t ex hälsa och sjukvård, idrott, navigation, övervakning och styrning, ljud och bild.

Signalbehandling handlar ofta om att extrahera och bearbeta information från sensordata, ljud och bild, eller data från andra källor. En stor del av forskningen sker i samverkan med industrin. Signalbehandling använder sig ofta av modeller baserade på fysikaliska, kemiska, biologiska, medicinska eller matematisk-statistiska samband. Vanligen används matematisk-statistiska metoder för att lösa de ingenjörsmässiga problemen. Ämnet befinner sig under stark utveckling och breddningen mot andra ämnesområden är betydande. Det finns därmed en stor potential för nyskapande tvärvetenskaplig forskning.

## Styrkor och svagheter

### Vetenskap med många användningsområden

Ämnet signalbehandling har växt fram ur områdena radar, telekommunikation och audioteknik på 1940- och 1950-talen. I stället för att låta forskare inom olika tillämpningsområden lösa samma problem oberoende av varandra valde man att samla kompetensen vilket ledde till att den nya digitala signalbehandlingstekniken spreds till fler områden, såsom t ex medicinsk teknik, lokalisering under vatten och i jorden, samt fordonselektronik. Dessutom möjliggjordes helt nya tekniska system, såsom GPS-baserad navigering och videokompression. Signalbehandling kan alltså sägas vara ett tillämpningsdrivet område, där nya behov ställer krav på nya teorier och metoder. Ämnet har en stark industriell anknytning och beskrivs ofta med hjälp av exempel från industriella användningsområden. Men det är den metodmässiga verktygslådan som behövs för att lösa liknande problem inom olika områden som definierar ämnet, vilket också är dess styrka. Signalbehandling är en gömd teknik som behövs i alla tillämpningar där man har behov av att tolka mätsignaler och annan information; amerikanska IEEE talar om "Signal Processing Inside".

### Flexibel verktygslåda

Modern signalbehandling är i hög grad modellbaserad och bygger ofta på fysikaliska, kemiska, biologiska, medicinska eller matematisk-statistiska samband som beskriver olika signaler eller de system som genererar dem. Ett exempel på modellbaserad signalbehandling är följning av omgivande fordon med hjälp av en eller flera sensorer (sensorfusion). För att få bra resultat behöver man veta sensorernas statistiska egenskaper och använda en rörelsemodell för fordon. Man kan även dra nytta av kunskap om t ex vägens sträckning. För att kombinera all denna information och hitta den bästa lösningen används ofta metoder från matematisk statistik och optimering.

Inom de flesta användningsområden söks ofta optimala lösningar. Då dessa kan vara olämpliga för implementering, handlar signalbehandling ofta om att ta fram förenklade metoder som kan användas i realtid till en rimlig kostnad och som har prestanda som inte avviker för mycket från det optimala. Här kan strukturen hos de underliggande modellerna eller kunskapen om data utnyttjas.

### Behov av breddning

I takt med områdets snabba tillväxt och utvidgning mot andra ämnesområden blir det alltmer tydligt att resurserna för att möta den framtida expansionen är en begränsande faktor. Svenska forskare hävdar sig generellt mycket väl i den internationella konkurrensen. Det är dock omöjligt att med rådande utveckling och resurser konkurrera inom mer än ett fåtal områden. Ur ett marknadsperspektiv kan man också skönja en internationell trend att tiden mellan grundforskning och färdig produkt minskar. För att en så stark forsknings- och industrination som Sverige inte ska tappa position internationellt så behövs utökade basresurser för grundforskning så att en breddning av verksamheten på nationell nivå kan ske.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Utvecklingen inom signalbehandling sker genom nya utmaningar från olika tillämpningsområden såväl som inomvetenskaplig, nyfikenhetsdriven utveckling av teori och algoritmer. Antalet signalbehandlare inom "traditionella" tillämpnings-områden, såsom radar och telekommunikation, har minskat något de senare åren på bekostnad av nya områden där utvecklingen har varit stark. Nedan listas några aktuella trender:

- Svensk forskning har bidragit väsentligt till framväxten av mobila kommunikationssystem; såväl talkodning som modulations- och accesstekniker (CPM, W-CDMA, OFDM etc.). Svenska forskare inom akademi och industri är ledande inom många områden. Ett exempel är utvecklingen av den så kallade MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) tekniken. Genom att använda flera antenner för sändning och mottagning når framtidens mobila system snabbare dataöverföring utan ökade krav på bandbredd eller signaleffekt. Denna teknik utvecklas nu vidare under namnet "Massive-MIMO".

- Ett snabbt framväxande område inom signalbehandlingen är aktiva system för fordonssäkerhet. Volvos säkerhetsvision 2020 är att ingen ska omkomma eller skadas allvarligt i en Volvo från år 2020. Tolkning av sensordata och kommunikation mellan bilar är två viktiga ingredienser i denna vision och svenska forskare inom universitet och industri samverkar aktivt.
- Samverkan med mikrovågs- och elektronikforskare kring modellering av komponenter och digital kompensering för ofullkomligheter. Detta leder till mer effektsnåla komponenter och kan på så sätt bidra till "Green ICT";
- Beräkningsintensiva statistiska metoder. Miniaturiseringen och effektiviseringen av digitala kretsar leder till att algoritmer med allt högre komplexitet kan implementeras i realtid. Det blir då möjligt att använda mer avancerade modeller inom t ex följning och navigering;
- Signalbehandling på högre abstraktions- och komplexitetsnivå. Som exempel kan nämnas schemaläggning och transmissionsstrategier för kommunikations-system med flera användare, där tekniker från matematisk spelteori har tillämpats. Ett annat aktuellt exempel är situationsanalys och riskbedömning i säkerhetstillämpningar;
- Bildbehandling och bildrekonstruktion. Här har det skett en stark utveckling inom det medicinska området. I de flesta fall kräver medicinsk bildgenerering komplicerade matematiska operationer. Signalbehandlare har i samverkan med forskare från andra områden utvecklat nya algoritmer för att lösa sådana rekonstruktionsproblem. Även inom process- och tillverkningsindustrin efterfrågas tekniker från detta område;
- Heterogena nätverk, ibland kallat för 5G, ökar i betydelse då man vill koppla ihop de cellulära näten med lokala nät som pico- och femtoceller och i förlängningen även sensornätverk och IoT. Det ställer stora krav på både signalbehandlingen och nätverken för att kunna tillhandahålla relevant information vid rätt tidpunkt. Inom biologiska nätverk sker en snabb kunskapsupbyggnad som kan bli avgörande för att i framtiden förstå hur kroppens organ och celler kommunicerar. Man talar här om "Molecular Communications" och "Gene Networks";
- Kommunikation med och lokalisering av maskiner och utrustning. Man kan förutse att allt fler maskiner kommer att bli uppkopplade mot olika trådlösa nätverk och områden som maskin-maskin kommunikation (M2M) och "Machine Learning" kommer att få allt större betydelse. Intelligent transportsystem och navigering i inomhusmiljö är andra tillväxtområden;
- Audiosignalbehandling är ett växande område. Med digital signalbehandling förändras förutsättningarna radikalt för att uppnå hög ljudkvalitet i olika sammanhang. Bilindustrin har på senare tid varit starkt drivande för bra ljud då det generellt sett är svårt att uppnå hög ljudkvalitet i en bilkupé. Inom audiokodning sker också en ökad fokusering mot upplevd ljudkvalitet;
- Effektiv datarepresentation och stora datamängder. Det forskas intensivt för att hitta metoder som kan reducera antalet mätningar av olika storheter utan att förlora prestanda i olika beräkningar. Internationellt talar man om "compressive sensing/sampling/estimation". De blir även alltmer angeläget att kunna extrahera relevant information ur stora datamängder. Inom "Big Data" öppnar sig nya möjligheter där signalbehandling kan bidra väsentligt;
- Medicinsk signalbehandling är också ett starkt tillväxtområde där det pågår mycket forskning internationellt och där det borde satsas mer i Sverige om vi ska kunna hävda oss i konkurrensen.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Signalbehandling har funnits som eget ämne i Sverige sedan mitten på 1980-talet. Ämnet har en stark ställning i Sverige på grund av tidiga ledargestalter inom telekommunikation och reglerteknik.

Signalbehandling är väletablerat internationellt och växer kraftigt i form av tillämpningsområden och antal publikationer. Svenska forskare publicerar flitigt i de högst rankade tidskrifterna, resultaten håller generellt mycket hög kvalitet och de röner ofta betydande uppmärksamhet. De har också starka internationella nätverk och samarbetet med ledande utländska grupper är väl utvecklat.

Idag finns framgångsrika samarbeten mellan forskare inom signalbehandling, reglerteknik, och kommunikationssystem. Man kan också förutse en utvidgning mot automation och robotik, biologi, medicin, datavetenskap, nätverk, artificiell intelligens etc. Ett samarbete över ämnesgränserna blir därför alltmer viktigt.

För att stärka ämnets ställning och konkurrenskraft behöver basresurserna förstärkas. Vilken storlek på forskningsprojekt som bäst främjar nyskapande forskning bör diskuteras. Det kan vara värt att överväga en nedtoning av stora centra till förmån för en ökad satsning på medelstora projektet och vanliga projektbidrag. Då kan nya områden, med högre risk än traditionella, undersökas till rimliga kostnader. Ett annat sätt att stärka området, och samtidigt ge unga forskare bättre karriärmöjligheter, kan vara att öka antalet postdoktjänster, vilket ger unga forskare möjlighet att konkurrera om forskningsbidrag på rimliga villkor. Universiteten kan då i större utsträckning behålla lovande forskare och samtidigt rekrytera begåvningar utifrån. Detta kan både bredda verksamheten och i förlängningen också tillgodose industrins ökade behov av disputerade signalbehandlare.

### Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Signalbehandling har historiskt haft modesta krav på infrastruktur men i och med att forskningsområdet vidgas mot andra vetenskaper samt att forskningsproblemen blir mer komplexa så ökar behovet. Testbäddar är viktiga för att t ex kunna bedriva systemforskning. Att utvärdera olika MIMO-tekniker, testa avancerade metoder för basstationskoordinering eller att genomföra radiokanal mätningar i verkliga miljöer kräver dyrbar utrustning.

## Övergripande områdesbeskrivning

Den tekniska mekaniken omfattar traditionellt de vetenskapliga grunderna för ingenjörskonst: utformning, konstruktion, materialval och tillverkning. Livslängd, hållfasthet, funktion, buller, strömning, miljöeffekter, drift och underhåll, på olika systemnivåer från enskilda komponenter till komplexa tekniska system är exempel på fenomen som beskrivs, beräknas och mäts. Simulering och optimering av funktion och resurser blir allt viktigare när kraven på prestanda ur skilda perspektiv skärps. Exempel på det senare är det allt viktigare inslaget av miljöaspekter såsom produkternas livscykelpåverkan och återanvändningsaspekter.

Forskningen kommer även fortsättningsvis att fokusera på grundläggande frågor som berör basindustrin såsom fordon av olika slag, bygg- och anläggningsindustri, metallindustri, skogs- och processindustri, verkstadsindustri och elektromekanisk industri. Emellertid har en kraftig breddning skett de senaste åren. Den snabba utvecklingen av beräkningsmöjligheter är ett resultat av nya effektiva numeriska algoritmer samt väsentligt förbättrad hårdvara. De nya beräkningsmöjligheterna, tillsammans med ny experimentell metodik och teknik, har öppnat helt nya forskningsområden inom både nya och gamla tillämpningsområden. Användningen av högpresterande datorer har etablerat ett nytt paradig för framtagandet av resultat både inom forskningen och i industriella tillämpningar.

Den beräkningsinriktade forskningen inom området utnyttjar idag de största existerande forskningsdatorerna, vilket gjort det möjligt att förstå och beskriva komplexa system och strukturer som tidigare enbart har kunnat beskrivas empiriskt. Ett utökat samarbete mellan beräkningsinriktad forskning och experimentell forskning, vilken bedrivs i avancerade laboratorier för de olika underområdena, t ex det nyligen bildade Odqvistlaboratoriet, kommer att förstärka Sveriges position inom teknisk mekanik, både avseende den experimentella forskningen såväl som den beräkningsinriktade forskningen. En viktig trend inom flera tillämpningsområden är ett större fokus på hur mekanismer och egenskaper på mikro- och nanonivån kopplas till materians makroskopiska uppförande, sk multiskaleanalys.

Området teknisk mekanik karaktäriseras av en stor del mångvetenskaplig forskning, som också kombinerar en mångfald tillämpningsområden. Denna starka forskning utgör basen för nya applikationsområden inom till exempel materialteknik, kemi, processteknik, miljöforskning, meteorologi, klimatforskning, förbränningsforskning, medicinsk teknik och bioteknik. Dessa landvinningar vilar på kombinationer av avancerad och storskalig beräkningsteknik och fysikalisk modellering, tillsammans med förfinade experiment.

Viktiga nya forskningsområden inom teknisk mekanik är medicinska och biologiska applikationer (biomekanik) som numera inkluderar strömning och blandningsprocesser på mikron och sub-mikron nivå (t.ex. *lab-on-chip*). "Virtual surgery" i luftvägarna eller i hjärtkärl systemen innebär att man kan hjälpa kirurgen i valet mellan operationsalternativ. Organs funktion och livslängd, proteser och implantat, mikroelektromekaniska system (MEMS), optoelektroniska system som sensorer, aktuatorer och motorer, Framtida akustiska forskningsfrågor drivs av komplexa problem relaterade till miljötekniska aspekter såsom buller, minimering av utsläpp, energiförbrukning. Ett ökande fokus på energiomvandlingsprocesser och klimatmodellering är också viktiga framtidsområden. Samtliga ovan uppräknade exempel stöds av och förutsätter forskning inom området teknisk mekanik.

## Biomekanik

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Biomekanik är ett i flera avseenden tvärvetenskapligt ämne. När mekanikens kunskapsbas och metodapparat används för biologiska frågeställningar krävs ofta bred kunskap inom såväl flödes- som solid- och strukturmekanik för att ge svar om de levande organismerna, på cell-, vävnads-, kroppsdel- eller systemnivå. Området ligger även mycket nära andra delar inom teknik och naturvetenskap som reglerteknik,

optimeringslära och materialteknik. Tillämpningen av biomekaniken kräver även i de flest fall en tvärvetenskaplig koppling till forskare inom livsvetenskaperna för att finna sitt nyttiggörande.

Biomekaniken kan sägas ha en del som handlar om en fortsatt kunskapsutveckling rörande de levande systemens funktion, när de traditionella tekniska metoderna anpassas för tillämpning på biologiska system. De mekaniska lagarna utnyttjas då för modellering och simulering av det biologiska systemet, i ett friskt eller patologiskt tillstånd. En annan väsentlig del handlar om utvecklingen av kliniskt användbar apparatur och av hjälpmedel för inbyggnad i det levande systemet. Reparationsmaterial för kroppsliga vävnader, proteser för skadade kroppsdelar och tekniska styrsystem integrerade med det mänskliga neurala systemet är några av de viktigare områdena. Även den mekaniska samverkan mellan människan och olika former av maskiner är av stort intresse inom forskningen.

## Styrkor och svagheter

Biomekaniken har en betydande fördel i det att området är en för många intressant tillämpning av såväl tekniska som medicinska grunddiscipliner, och områdets utveckling bromsas inte av brist på presumtiva studenter på samtliga nivåer; resurser och samordning är däremot mer bekymmersamma.

**Styrkor:** Storskaliga simuleringar ökar drastiskt i betydelse, både för de multifysikaliska simuleringarna på cellnivå och för detaljerade, individualiserade modelleringar av hela människor eller kroppsregioner. Här ges stora möjligheter för biomekaniken att bidra till att lösa problem av stor vikt för samhället. För att detta ska vara möjligt bör forskning som rör utveckling av nya simuleringmetoder och dess användning på högpresterande datorer prioriteras även inom detta område. Den experimentella mekaniken är även här en nödvändig förutsättning för utveckling och bör också prioriteras.

**Svagheter:** Inom biomekaniken är ett tvärvetenskapligt angreppssätt en absolut förutsättning för framgång. Sådana områden är alltid mer eller mindre problematiska vad gäller finansiering, då de tenderar att vara perifera för existerande finansiärer. Speciellt under innevarande paradigm, där forskning främst stöds inom områden som redan visat sig starka, är det viktigt att också satsa på tvärvetenskaplig forskning. Motsvarande satsningar på multidisciplinära forskningsfrågor är nödvändiga för områdets fortsatta utveckling.

För att mest effektivt öka synergier mellan främst teknik- och medicinforskare, måste förbättrade systematiska möjligheter till samverkan runt idéutveckling och metodöverföring skapas mellan de akademiska fakulteterna.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

En generell trend inom ämnet är en ökande grad av komplexitet i de problem som angrips. Denna ökande komplexitet kännetecknas ofta av analys på olika längds- och tidsskalor samt kombination av olika fysikaliska fenomen. En förväntad trend är mot predikterande simuleringar av tänkta sjukdomskonsekvenser och behandlingsresultat.

En följd av både den åldrande befolkningen i industriländerna och av den ökade överlevnadschansen av mycket förtidigt födda barn blir att det är mycket angeläget att studera och modellera de strukturella förändringar som sker i skelett, muskulatur, kärlväggar, broskytor och i sinnesorganens vävnader. Relevanta beskrivningar av de biologiska materialen, som bland annat tar hänsyn till de förändringar som sker över ett antal olika tidsskalor, är en nödvändig förutsättning för att förbättrade simuleringmodeller ska kunna utvecklas. Ett exempel på en tydligt åldersrelaterad frågeställning rör ledytors egenskaper, och metoder att återställa degenererad eller skadad vävnad. Förtidigt födda barn, och även barn födda av äldre föräldrar, löper en mycket högre risk att drabbas av neurologiska skador och funktionshinder. I huvudtrauma och trafikskador är barn och äldre personer kraftigt överrepresenterade. Även blodomloppets komponenter blir alltmer viktiga att kunna modellera och simulera: till exempel krävs icke-newtonska modeller för blod och en anisotrop viskoelasticitetsmodell för kärlväggarna. En sådan utveckling möjliggör, förutom en ökad förståelse för vävnadernas funktion och egenskaper, direkt klinisk tillämpning inom kirurgi, intensivvård, samt i pre-operativ vård av, exempelvis, njur- och hjärtsvikt samt administrering av läkemedel.

Att individualisera beskrivningarna, så att de får giltighet inte bara för medianmänniskan är en mycket viktig uppgift. En stark trend är att modellera vävnader patientspecifikt där en komplex geometribeskrivning av varje patient görs genom datortomografi eller magnetisk resonansavbildning. Fortsatta utveckling av de kliniska avbildningsmetoderna, och de vidhängande tolkningsmodellerna, så att de i än högre grad och med högre noggrannhet kan identifiera olika vävnader, samt deras kvalitet och egenskaper, är en mycket viktig trend i nyttiggörandet av forskningen. Detta gäller för alla delar av det mänskliga systemet, men är inte minst viktigt för det skelett-muskulära systemet, för hjärnan och skallbenet, och för blodomloppet. Med denna utveckling blir möjligheterna att använda de biomekaniska simuleringarna i daglig klinisk vård och inte enbart i forskningsmässigt typiserade sammanhang, i allt högre grad en realitet. Dessutom möjliggörs säkrare tolkningar av uppkomstmekanismer i samband med trauma eller sjukdom.

Mänskliga rörelser är ett annat väsentligt område för biomekaniken. Områden har stor betydelse för utvecklingen av proteser av olika slag, men har också en kliniskt diagnostisk betydelse. Registrering och visualisering av mänskliga rörelsemönster kan användas för att kartlägga patologier i det neurala systemet. Kliniska slutsatser från dessa kan också anvisa de optimala kliniska interventionerna i det individuella fallet. Förståelsen för bakgrunden till flera av de stora folksjukdomarna kan därmed förbättras, vilket också kan anvisa behandlingsmetoder. Optimal reglering, som ett sätt att förstå det neurala systemets programmering av mänskliga rörelser, kan bidra till en ökad förståelse för strategin bakom en individs verkliga prestation relativt den bästa möjliga prestation inom de individuella förutsättningarna.

En viktig aspekt av biomekanik finns i den mänskliga interaktionen med utrustningar och apparatur av olika slag och i olika sammanhang. Med en lång tradition inom ergonomi och arbetsvetenskap har utvecklingen under senare år till stor del kommit att handla om aktiva och passiva säkerhetssystem i bland annat bilar och andra fordon. Människans förmåga att skydda sig själv som del av det tekniska systemet och den mänskliga kroppens reaktion på systemutlösta säkerhetsutrustningar blir allt viktigare aspekter på framtida fordonsutveckling. Sedan några år tillbaka går metodutvecklingen inom biomekanik mot mer detaljerade flerskaliga modeller. Med en bättre förståelse av cellförändringarna som uppstår efter trauma, kan bättre säkerhetssystem eller terapeutiska läkemedel utvecklas. En närmast omvänd aspekt av detta är den snabba utvecklingen av mekanisk utrustning, på mikro- eller nanoskala, för användning inom kroppen, vilken genom skalförändringen ställer nya krav på de traditionella grundläggande modellbegreppen.

Metodapparaten från den tekniska mekaniken ger dessutom möjligheter att tränga djupare in i biologiska och medicinska frågeställningar. Som ett exempel på detta kan nämnas de mekaniska egenskaperna och beteendena hos celler, där den cellfysiska forskningen har givits möjligheter att experimentellt studera hur cellernas verksamhet påverkas av mekaniska stimuli. Den tekniska mekanikens metodapparat och anpassbarhet till multifysikaliska frågeställningar ger hittills mycket litet prövade möjligheter att simulera cellernas funktion.

I svenskt näringsliv är avnämbarbranschen för den biomekaniska forskningen stor, och många världsledande företag finns inom medicinsk teknik. Trots detta är branschen relativt otydlig, då den fortfarande primärt består av små nischföretag och dotterbolag för stora internationella företag. Ett effektivare tillvaratagande av forskningen inom området skulle främjas av förstärkta och systematiska satsningar på kopplingen mellan forskningen och den industriella utvecklingen.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Biomekaniken utvecklas för närvarande starkt i Sverige, och har varit både starkt och snabbt växande internationellt i flera decennier. Biomekanikavdelningar och centra finns i de flesta excellenta universitetet och forskningsinstituterna i världen. I absoluta tal är den svenska forskningen starkt växande, och den svenska andelen av den globala vetenskapliga produktionen är relativt hög. Den tekniska utgångspunkten har, såväl internationellt som nationellt, oftast varit den tekniska mekaniken och dess metodapparat. De uppnådda framstegen är mycket viktiga för utvecklingen av svenskt näringsliv, och för samhället, inte minst i vårdssammanhang.



## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Det kan ses som en spännande men kritisk tid idag i Sverige att följa med den starka internationella frammarschen. Kompetensen och intresset i Sverige finns, men stora infrastrukturer är få och begränsade till ett fåtal forskningsområden, och deras uppbyggnad kan utmanas av de fakultets- och även myndighetsgränser som finns.

De experimentella delarna av biomekanikforskningen på både vävnads- och hel individnivån bör förstärkas och sådan förbättring pågår också. Eftersom dessa delar är kapitalkrävande bör samordning ske över landet och sådan nationell infrastruktur prioriteras av Vetenskapsrådet. De stora kostnader som institutionerna inom det tekniska mekanikområdet har för sina lokaler och laboratorier har medfört att avdelningar med stor laborativ och experimentell verksamhet har fått stora kostnadsökningar. En satsning på forskningsinfrastrukturer behövs i hög grad, men även mer finansiering för drift och systemunderhåll.

## Fastkroppsmekanik

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Fastkroppsmekaniken utgörs av matematisk modellering, numerisk simulering och experimentella studier av det mekaniska beteendet hos fasta material, komponenter och mekaniska system. Det omfattar traditionella ämnen som hållfasthetslära, strukturmekanik, dynamik, tribologi, men det har också en stor kontaktyta mot såväl materialfysik som beräkningsmatematik. De studerade problemen är ofta multifysikaliska till sin natur, och en generell trend inom ämnet är en ökande grad av komplexitet i den matematiska modelleringen. Denna ökande komplexitet kännetecknas av analys på olika längd- och tidsskalor samt kombination av olika material och fenomen. Modelleringen är baserad på grundläggande fysikaliska principer (balansekvationer, termodynamik). Ökande forskningssamarbeten – med materialfysiker, fysiker, kemister, matematiker – ses som avgörande för en fortsatt stark utveckling inom området. Ämnet är således synnerligen brett.

Fastkroppsmekaniken kännetecknas av en stark förankring inom industriella och samhällsrelevanta problemställningar, och den är en väsentlig del av innovationsprocessen. Tillämpningar finns inom alla existerande industriella branscher.

### Styrkor och svagheter

Matematisk beskrivning av mekaniska egenskaper med makroskopiska (fenomenologiska) materialmodeller, till exempel viskolelasticitet, plasticitet, viskoplasticitet samt skademekanik och brottmekanik, tillhör de klassiska forskningsområdena inom fasta kroppars mekanik. Tillämpningarna finns på alla typer av material och olika deformations- och brottfenomen, inte minst utmattnings-, i industriella produkter och byggnadsverk. Ett viktigt delområde är kalibrering och validering av modellerna med inbyggd felkontroll. Modellernas kvalitet och noggrannhet bör alltid ställas i relation till noggrannheten hos beräkningsmetoderna, och denna avvägning sker genom adaptiv modellering-diskretisering. Forskningen är synnerligen väletablerad och bedöms behålla sin relevans under överskådlig framtid i industriella tillämpningar.

Under de senaste decennierna har det skett en mycket stark utveckling internationellt, och även nationellt, inom området flerskalig modellering baserad på (främst) olika typer av analytisk och beräkningsbaserad homogenisering. Inom beräkningsmekaniken är denna teknik känd som FE<sup>2</sup>, med vilket avses att finita-element-diskretisering görs på två olika skalor samtidigt. Härvid ersätts fenomenologiska modeller på makroskalan med flerskaliga ”mikromekaniska” modeller på lägre skala. I extremfallet utnyttjar man atomistisk (eller till och med kvantmekanisk) modellering så att gränsen mellan kontinuummekanik och fysik (inkl statistisk mekanik) suddas ut. Sammanfattningsvis är avsikten att på ett mera fundamentalt sätt ta hänsyn till hur materialets heterogena mikrostruktur påverkar makroegenskaperna. De vanligaste tillämpningarna finns i gruppen polykristallina metaller. Exempel på andra tillämpningar är partikelkompositer, fibermaterial (som papper), pulvermaterial, betong. Synsättet med flerskalig modellering kan också användas för att förstå och prediktera olika ytrelaterade fenomen, till exempel adhesiv och abrasiv nötning eller friktion mellan två fasta

kroppar. Sådana fenomen är av avgörande betydelse för en komponents eller ett systems livslängd och energiförbrukning.

Många material karaktäriseras av design på en given geometrisk skala som ger specifika egenskaper, exempelvis laminatbaserade kompositer. Kompositmekanik, speciellt brottmodellering, är ett fortsatt relevant forskningsområde. En grupp av material som tilldragit sig starkt intresse internationellt under senare år är designade material, vars karaktäristiska (ibland exotiska) egenskaper bestäms av den designade nano/mikrostrukturen och således inte av den atomära uppbyggnaden. Ett användningsområde för sådana metamaterial är skydd av vibrationskänsliga komponenter genom att mekaniska vågor avleds. Viss forskningsaktivitet finns etablerad nationellt.

Inom strukturmekniken behandlas system av komponenter för maskiner, fordon och byggnadsverk av olika slag. Optimal kontroll av mekaniska system är ett högrelevant men komplext forskningsområde. Till viktiga frågeställningar hör också strukturoptimering under bivillkor i form av relevanta dimensioneringskrav. För ökad tillförlitlighet används stokastiska modeller för att beskriva variationer av materialegenskaper, laster och randvillkor. Många strukturmekaniska problem utgör komplicerade kontaktproblem i samband med stora deformationer, till exempel vid materialformning och i fordonskollisioner. Forskningen är väletablerad nationellt, men bilden är splittrad.

Användningen av mekatronik, det vill säga en integration av elektronik i mekaniska system, har ökat dramatiskt i fordon med intelligenta broms- och styrningssystem men också i människokroppen genom konstgjorda organ med integrerade mikrosensorer och aktuatorer. Den industriella trenden är att bygga upp komplexa produkter, såsom fordon, av autonoma intelligenta moduler. Denna typ av forskning, som utgör en syntes mellan olika discipliner, finns också nationellt.

En klass av kopplade problem karaktäriseras av Fluid-Struktur-Interaktion (FSI). En högaktuell tillämpning FSI är vindkraftverk. Den nationella forskningen karaktäriseras av avancerade tillämpningar snarare än grundläggande metodutveckling.

En viktig form av interaktion mellan solid och fluid utgörs av den ”mikrostrukturella interaktion” som sker vid strömning i porösa material. Detta är ett klassiskt problem inom geomekanik, men på senare år har det funnit nya tillämpningar inom processteknik och inom biomaterial. Forskningsområdet är väletablerat nationellt, både vad gäller grundläggande modellering och avancerade tillämpningar.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Storskaliga simuleringar kan göras mer realistiska med ökande beräkningskapacitet, och denna möjlighet stimulera till mer fundamental modellering. Inom materialmekaniken kan man urskilja flera trender: Med utgångspunkt i fenomenologisk modellering och s.k. högre ordningens (icke-lokal) kontinuummekanik, finns ett klart internationellt fokus på s.k. fasfältmodellering för att simulera komplicerade fenomen såsom skadeutveckling och propagering av sprickor/spricknätverk i 3D. Andra tillämpningar för fasfältmodellering är fasomvandlingar och (biologisk) tillväxt. Samtidigt fortsätter den starka utvecklingen inom flerskalig materialmodellering, som är en förutsättning för att simulera egenskaperna hos nya optimerade material i ett virtuellt laboratorium. Forskningen kräver intensifierad samverkan med materialteknik samt teoretisk och experimentell fysik, och denna internationella trend bör stimuleras ytterligare nationellt.

Ett viktigt forskningsområde är modellering och numerisk simulering av piezoelektriska, magnetostruktiva och andra ”smarta” material, där man måste ta hänsyn till komplexa elektro-magneto-termo-mekaniska kopplingar. Detta område, i vilket den klassiska mekanikens balansekvationer och Maxwells ekvationer kopplas via de konstitutiva sambanden, har expanderat starkt internationellt och har många potentiella användningar. Ett exempel är smarta dämpningsmaterial i form av magnetosensitiva kompositer bestående av magnetiska fibrer i en elastomermatris. Inom kopplade och multifysikaliska problem finns både potential för och behov av utökad samverkan mellan teknisk mekanik, tillämpad fysik och elektromagnetisk fältteori. Det bör också noteras att multifysikaliska problem i många fall är ytterst beräkningsintensiva och därför beroende av en stark infrastruktur för högprestandaberäkningar.

Utmaningar finns inom ett stort antal områden där dynamiska laster är väsentliga. Ett exempel är kalibrering av modeller för dämpning, vilket utgör ett dynamiskt inversproblem. Invers identifiering med begränsad och

osäker tillgång till responsdata är en klass av problem som bedöms få allt större betydelse. Detta gäller såväl strukturidentifiering som lastidentifiering. Skade-, brott- och utmattningsanalyser blir fortsatt viktiga i ljuset av nya material, komponenter och system som utvecklas genom alltmera restriktiva energi- och miljökriterier. Forskningen inom teknisk mekanik kommer fortsatt att vara central för att möta de krav som ställs på högre prestanda hos olika typer av transportmedel i kombination med lättare strukturer, mindre material- och energiåtgång samt förbättrad tillförlitlighet.

En fortsatt satsning måste göras på adaptiva finita-element-metoder för att välja modell och beräkningsnoggrannhet i såväl rum som tid, vilket är i linje med den internationella utvecklingen. Det är önskvärt att uppnå automatisk kvalitetskontroll av beräkningsresultat till acceptabel kostnad även i kommersiella beräkningsprogram. Att förse yrkesverksamma ingenjörer med effektiva, robusta och kvalitetssäkrade beräkningsmodeller och -metoder är en viktig utmaning för framtida forskning i (beräknings)mekanik.

Även den experimentella mekaniken har genomgått en stark utveckling under de senaste två decennierna. Avbildande metoder såsom DSP och DVC (*Digital Volume Correlation*) har möjliggjort samtidig mätning och analys av hela förskjutnings/deformationsfält, termografering har möjliggjort studier av värmegenerering och interferometriska metoder används standardmässigt för att studera ytstrukturer inom tribologin. En tydlig trend är utvecklingen av metoder för tredimensionell deformationsanalys med mycket hög upplösning, exempelvis via tomografi, så att fluktuationsfält i en mikrostruktur kan mätas. Ett mål är att utföra experiment *in situ*, dvs experimentet genomförs med provkroppen placerad i tomografen. De experimentella metoderna bör kunna matcha den ökande detaljrikedom man får från 3D-simuleringar som är möjliga genom den stadigt tilltagande beräkningskapaciteten. Nationellt tas initiativ att etablera sådan experimentell kapacitet, t.ex. i samband med anläggning av nya mätstationer vid Maxlab och ESS.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Ämnesområdet har en utomordentligt stark ställning internationellt, såväl inom akademien som i industriella tillämpningar, och nyexaminerade ingenjörer och forskare har en synnerligen god arbetsmarknad, inte minst i Sverige. Speciellt har beräkningsmekaniken utvecklats starkt såväl nationellt som internationellt, och svenska forskare har sedan starten av finita-element-tekniken på 1960-talet haft en stark ställning i det internationella forskarsamhället med väl utbyggda nätverk. På nedsidan kan man konstatera att den experimentella forskningen blivit kraftigt reducerad, förmodligen mera i Sverige än internationellt. Detta gäller också experimentella inslag i undervisningen.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Eftersom experimentell utrustning är dyrbar bör samverkan ske mellan akademiska institutioner, institut och, inte minst, de företag som har välutbyggda faciliteter för materialprovning. En samordning bör ske inom hela landet, och sådan nationell infrastruktur bör stödjas av Vetenskapsrådet. En sådan samordning inom hela den tekniska mekaniken har påbörjats och ett exempel på detta är formeringen av Odqvist laboratoriet på KTH som innefattar fastkroppsmekanik, fluiders mekanik och akustik, och som avser att ta nationellt ansvar inom dessa områden.

En annan mycket viktig nationell infrastruktur för den tekniska mekaniken är moderna högpresterande datorer. Dessa tillhandahålls idag till största delen via SNIC (*Swedish National Infrastructure for Computing*), och det är mycket viktigt att resurserna till denna infrastruktur fortsätter att öka.

# Fluiders mekanik och teknisk akustik

## Beskrivningen av forskningen inom ämnet

Inom fluiders mekanik och teknisk akustik behandlas de fysikaliska fenomen och processer som påverkar det mekaniska beteendet hos fluider, ofta innefattande kopplade och multifysikaliska problem. Till akustiken hör också strukturakustiken, som i viss mån står närmare fastkrioppsmekaniken. En generell trend inom ämnet är en ökande grad av komplexitet i de problem som angrips. Denna komplexitet kännetecknas ofta av analys över ett större omfång av längd- och tidskalor, kombinerade frågeställningar utifrån olika fysikaliska fenomen. På grund av komplexiteten i de problem som angrips ses ett ökande behov av generaliserad matematisk modellering. Samtidigt är området helt beroende av beräkningsinfrastruktur och utveckling av nya avancerade mätmetoder. Metodutveckling inom modellering, beräkning, mätteknik och analys av stora datamängder ses därför som centralt för området.

Området kännetecknas av en stark förankring inom industriella och samhällsrelevanta problemställningar och en breddning har skett mot områden såsom energiproduktion, mineral- och processtekniska sammanhang samt fenomen som innefattar kemiska processer till exempel förbränning och förgasning.

## Styrkor och svagheter

Under den senaste tioårsperioden har en stark utveckling inom storskaliga beräkningar inom fluiders mekanik och teknisk akustik banat väg för ett flertal vetenskapliga genombrott. Bland annat har genombrott skett i så kallad direktsimulering av turbulens, som har öppnat helt nya möjligheter att förstå de grundläggande fysikaliska mekanismerna. De storskaliga beräkningarna har i sin tur gett upphov till ett ökat behov av att på ett effektivt sätt hantera och analysera stora datamängder. Den experimentella fluidmekaniken, främst i form av nya optiska mätmetoder, har även den genomgått en stark utveckling under de senaste två decennierna. Bland annat har olika avbildande metoder såsom höghastighet-, stereoskopisk- och tomografisk-PIV möjliggjort samtidig mätning och analys av hela hastighetsfält. Tredimensionella ljudfälts generering och utbredning har kunnat mätas med stor detaljrikedom med holografi och PLIF. Andra spektroskopiska metoder har möjliggjort studier av koncentrationer av olika ämnen. Interferometriska metoder används standardmässigt för att studera ytstruktur och oljefilmstjocklek inom tribologin. Den experimentella tekniken utvecklats vidare till våglängder utanför den synliga. Datortomografi, nuklärresonans avbildning samt nyttjande av korta våglängder (t.ex. MAX-lab) möjliggör experimentella studier av fluiders viskoelastiska egenskaper. Mättekniken för mikroskala är också under stark utveckling.

Flerfasströmningsaspekter kommer att spela en växande roll i utvecklingen inom processindustrin och särskilt inom bioteknik och läkemedelsindustri under den kommande tioårsperioden. Mycket intressant är också forskning inom strömning i flerskaliga porösa material med kemiska reaktioner samt mass- och värmetransport, exempelvis med tillämpning till energialstrande- och mineralindustri.

Genom ett nära samarbete med svensk industri även inom grundläggande forskning inom fluiders mekanik och teknisk akustik, sker ett flöde av forskarkompetent personal från den akademiska forskningsmiljön till industrin och i vis mån vice versa. Man kan också märka de allt kortare vägarna mellan grundforskningen på universiteten och de modeller och metoder som används inom industrin. Vidare kan man notera det stora behovet inom industrin av grund- och forskningsutbildade med kompetens inom modern strömningssimuleringsteknik.

Strömningssimuleringstekniker i kombination med ny kunskap inom reglerteknik, avancerade beräkningsmetoder och avancerad mikrosensorteknik kommer att öppna många nya designmöjligheter inom flera industriella sektorer. Den starka utvecklingen av simuleringsmetoder i kombination med avancerad matematisk modeller kommer att innebära bättre predikteringsmetoder.

Nya tillämpningar mot mikroströmningsområdet, biomedicinska och biotekniska problemställningar, miljö- och klimatrelaterade strömningssproblem tillkommer. Mikroströmning kommer exempelvis in i kylning av mikroelektronik. Användningen av så kallade mikroelektromekaniska system (MEMS) har i internationella och svenska forskningsprojekt börjat appliceras bland annat för strömningssimulering och i biomedicinska

sammanhang. Som exempel kan man nämna de tryckgivare som används vid förenklade bypassoperationer (ballongsprängning).

Tribologi är en kombination av strömningsmekaniska, fastkroppsmekaniska och materialtekniska frågeställningar. En viktig framtida problemställning gäller hur smörjfilmsuppbyggnad kan modelleras för olika typer av smorda kontakter, ytjämnheter, smörjmedel och driftsvillkor (temperatur, glidhastigheter, belastning).

I mångt och mycket liknar utvecklingen inom den tekniska akustiken den inom strömningsmekaniken. Beräkningsmodellerna och simuleringstekniken har utvecklats och förfinats och är idag viktiga verktyg i fördjupningen och utvecklingen av förståelsen för strukturakustiska och strömningsakustiska fenomen. Dessa ställs i allt högre grad på sin spets i takt med att de tekniska systemens uppbyggnad och prestanda förändras.

Utvecklingen inom tillämpningarna av den tekniska akustiken, går mot allt lättare och mer kompakta konstruktioner, byggda i material som förväntas vara återvinnings- eller återanvändningsbara. Att behålla eller ytterligare förbättra prestanda gör att forskningen kring dessa trender söker sig mot en ökad förståelse för grundläggande frågeställningar och studier av fenomen, från makroskala ner till mikroskala, och i förlängningen på nanoskala. Synergier mellan avancerade högupplösande beräkningsmetoder och motsvarande högupplösande experimentella fältmetoder har förstärkt områdets vetenskapliga nivå och öppnar för nya forskningsfrågor. Liksom i strömningsmekaniken ses även inom tekniska akustiken ett ökat fokus på forskningsfrågor som innefattar frågeställningar flera ämnesområden. Till exempel, inom modellering av akustiska fenomen rörande däck/vägbande interaktion måste aspekter från kontaktmekanik, materialvetenskap, strukturljud, energiförbrukning, ljudutbredning över mark med komplex impedans vara med.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Flera mycket viktiga delområden med stora utvecklingsmöjligheter kan identifieras inom strömningsmekaniken och den tekniska akustiken. Storskaliga simuleringar ökar drastiskt i betydelse både för grundforskningen och i de industriella tillämpningarna. Här finns stora möjligheter för grundläggande forskning inom fluiders mekanik och teknisk akustik att bidra till att lösa problem av stor vikt för samhället. För att detta ska vara möjligt bör forskning som rör utveckling av nya simuleringstekniker och dess användning på högpresterande datorer prioriteras. Den experimentella forskningen är en förutsättning för utveckling och bör prioriteras. Nano- och mikrofluidmekaniken är också viktiga komponenter för att vi ska uppnå en djupare fysikalisk förståelse av de grundläggande fysikaliska fenomenen. Även här är experimentell teknikutveckling en nödvändig del, men också en förstärkt samverkan med andra vetenskapsområden som till exempel medicin, materialteknik, fysik och kemi. Vidare finns de traditionellt och fortsatt viktiga områdena för svensk basindustri, exempelvis fordonsindustri, skog, mineral, byggindustri, processindustri, energiomvandlande industri, byggande och verkstadsindustri.

Forskningen inom strömningsmekanik och teknisk akustik har under senare år till stor del koncentrerats till ett antal starka forskningsmiljöer. Detta innebär att kompetensen också till stor del har delats upp geografiskt. Det är högt prioriterat att dessa starka miljöer får tillräckliga medel i framtiden så att de kan fortsätta att konkurrera på den internationella forskningsfronten. Samarbetet mellan de starka miljöerna är mycket viktigt och bör förstärkas.

Generellt är samarbetet mellan de tekniska institutionerna och svensk och utländsk industri väl utbyggt och är även en viktig del för samhället i övrigt. Området ger ett stort och viktigt tillskott av kvalificerad personal till industrin och samhället. Vetenskapsrådets och de tekniska fakulteternas roll är mycket viktig i detta sammanhang.

En bred verksamhet inom strömnings- och akustikområden bör eftersträvas. Kompetensen inom moderna beräkningsmetoder och modellering av komplexa strömningsfenomen bör stödjas. En fortsatt utveckling av moderna experimentella metoder bör också stödjas, speciellt där sådan verksamhet sker i kombination med beräknings- och modelleringsverksamhet, gärna i konstellationer med flera forskningsgrupper involverade. Gränslandet mellan teknisk mekanik och grenar av biokemi och biomedicin är framtidsområden där satsningar bör stödjas.

Utvecklingen av metodiken kring kopplingen mellan strömningsmekaniken och strömningsakustiken bör stödjas, liksom utvecklingen av akustiska materialmodeller för nya komplexa material och materialsystem.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Forskningen i Sverige inom fluiders mekanik har byggts upp under en längre tid och har nu en stark internationell ställning inom ett antal underområden. Utvecklingen är stark inom området och flera starka institutioner bidrar till detta förhållande. Området teknisk akustik har förstärkt sin starka internationella ställning under de senaste tio åren. Forskningen karakteriseras idag av en stark simulerings- och modelleringsverksamhet i ett tätt samarbete med utveckling inom experimentella metoder. Även nya aspekter såsom multidisciplinär optimering, konstitutiv modellering av nya material, strömningsakustiska simuleringar och mätmetoder etablerats som viktiga inslag i den pågående forskningen. Sverige har ett antal väl utrustade laboratorier vid de tekniska högskolorna. Man kan notera ett ökat samarbete kring anskaffning och utnyttjandet av modern tung mätutrustning. Flera institutioner medverkar i gemensamma nationella projekt (t.ex. SFO inom e-science, energi och klimat), vilket underlättar samarbetet för utnyttjandet av infrastruktur. Utvecklingen av både beräknings- och experimentella metoder drivs idag av synergier mellan strömningsmekaniken och strömningsakustiken.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

Inom den experimentella forskningen kommer vi att se ett ökat behov av och möjligheter för att avsevärt förbättra tids- och rumsupplösningen av mätdata. Detta kommer att ge data för att kunna utveckla och validera mer avancerade modeller för hantering av strömningsfenomen med högre noggrannhet och detaljer som är viktiga t.ex. för koppling till kemiska reaktioner, förbränning eller generering av strömningsinducerat buller. Möjligheter att studera strömning med värme- och masstransport och kemiska reaktioner som idag inte är möjliga kommer att kunna analyseras experimentellt genom användning ett bredd spektrum av våglängder. En del av dessa "ljus" källor är stora nationella eller internationella anläggningar (som MAX-IV och ESS). En samordning bör ske inom hela landet, och sådan nationell infrastruktur bör stödjas av Vetenskapsrådet. En sådan samordning inom hela den tekniska mekaniken har påbörjats och ett exempel på detta är formeringen av Odqvist laboratoriet på KTH som innefattar fastkroppsmekanik, fluiders mekanik och akustik, och som avser att ta nationellt ansvar inom dessa områden.

För modellering och simulering förväntas en ökad användning av högprestandatorer. Man kan konstatera att det är datorkraft som sätter gränser under överskådlig framtid. Dock kommer utvecklingen inom numeriska metoder att möjliggöra simuleringar på ett mer effektivt sätt och på så sätt öka komplexitetsgraden i de beräkningar som görs. Den mängd data som genereras vid sådan beräkningstunga simuleringar och även vid detaljerade mätningar kräver storlagringskapacitet och avancerade bearbetningsmetoder och algoritmer. I detta sammanhang kan de två SFO organisationer (SeRC och ESSENCE) tillsammans med SNIC utgöra en bra utgångspunkt för utveckling av infrastruktur inom området.

---

# TEKNISK OCH TILLÄMPAD FYSIK

---

## Övergripande ämnesbeskrivning

Ämnet teknisk fysik, motsvarar relativt väl engelskans “applied physics” vilket kan översättas med “tillämpad fysik”. Målet för forskningen inom området är att bygga en grundläggande förståelse för fysikaliska fenomen och processer på detaljnivåer relevanta för de olika tekniska tillämpningarna. Detta kräver inte bara utomordentligt goda insikter i ett flertal av den grundläggande fysikens delområden, utan ofta även inom andra områden såsom elektronik, materialvetenskap, kemi, biologi, medicin etcetera. Området karakteriseras alltså av ett tydligt tvärvetenskapligt förhållningsätt och forskningen motiveras som regel av distinkta behov och möjligheter med stor samhällsrelevans. Forskning inom teknisk fysik är av central betydelse för bland annat utvecklingen av nya analysmetoder inom medicin, biologi och miljö; för utvecklingen av nya material och tekniker för ett hållbart samhälle; och för utveckling av ny informationsteknologi. Framstegen inom teknisk fysik begränsas till en del av tillgången till högteknologisk utrustning för tillverkning, analys och simulering av artificiella strukturer och material. Ett stort problem för området har varit att prioriteringen av finansiering av medeldyr vetenskaplig utrustning på universitet och högskolor i en del fall ännu inte fungerat fullt ut.

Forskningen inom området kan till exempel röra utvecklingen av nya instrument och ny mätteknik, nanoteknik, optik, tillämpad supraleddning och magnetism, spintronik, solceller, biofysik och biosensorer, nya metoder för mikroskopi och spektroskopi, tunnfilmsteknik, etcetera.

Tillämpad fysik har av tradition en stark ställning inom svensk forskning och utveckling vilket även gäller idag. Till en del bygger detta på den framgångsrika och populära utbildningen i ämnet (Teknisk fysik) som tillhandahålls av landets tekniska högskolor och vissa universitet. Ett traditionellt starkt område är utveckling av nya experimentella metoder där forskningsrönen i flera fall omsatts i kraftfulla analysinstrument, exempelvis inom röntgenfotoelektron-spektroskopi (XPS), laserbaserad fjärranalys (LIDAR) och ytplasmonresonans (SPR)-sensorer.

Stora investeringar görs i kraftfulla nationella forskningsanläggningar i Lund, MAX IV och ESS och man diskuterar även möjligheten att utveckla en svensk frielektronlaser. Dessa anläggningar erbjuder goda möjligheter att stärka svensk forskning inom till exempel materialvetenskap och därmed indirekt skapa förutsättningar för framgångsrik forskning inom tillämpad fysik. Men det är viktigt att satsningarna inte äventyrar finansieringen av nödvändig teknisk utrustning som ligger i ett kostnadsintervall lite över vad som kan betecknas som medeldyr och som typiskt finansieras med universitetsmedel och genom enskilda forskares externa anslag.

En ofta försummad aspekt av behovet av utrustning och forskningsinfrastruktur är stöd på laboratorieingenjörssidan och finansieringen av kostnader för drift av laboratorier som är mindre än de nationella. Till exempel är renrummen samlade inom MyFab-infrastrukturen av högsta internationella klass, men kan behöva ett stabilt stöd på lång sikt för att kunna utnyttjas på bästa sätt för forskningen i tillämpad fysik. Vidare när det gäller experimentell utrustning är möjligheten att ta fram ny unik skräddarsydd instrumenteringsteknik av avgörande betydelse och ett nödvändigt komplement till kommersiellt tillgänglig utrustning. Sådant arbete genererar ofta färre publikationer och citeringar under uppbyggnadsskedet. Då detta är en viktig del av det arbete som krävs för att kunna vara internationellt ledande inom området är det viktigt att även detta räknas som meriterande i samband till exempel med ansökningar om forskningsmedel.

## Teknisk och tillämpad fysik

### Beskrivning av forskningen inom ämnet

Tillämpad fysik innefattar forskning som med utgångspunkt från grundläggande förståelse för fysikaliska fenomen och processer angriper viktiga tekniska problem ofta med för samhället stor relevans. Ämnet är alltså starkt förankrat i grundläggande fysik och naturvetenskap, men den teknikvetenskapliga dimensionen är ofta

tydlig och forskningen är alltid motiverad utifrån distinkta behov och möjligheter. Mycket av forskningen inom ämnesområdet har en tvärvetenskaplig karaktär, många gånger genom tydliga inslag av kemi, biologi och medicin utöver fysik. I områdesbeskrivningens natur ligger att gränsdragningen gentemot närliggande ämnen och områden inte alltid är självklara eller ens meningsfulla. Forskning inom tillämpad fysik är av central betydelse för bland annat utvecklingen av nya analysmetoder inom medicin, biologi och miljö; för utvecklingen av nya material och tekniker för energiproduktion och ett hållbart samhälle; och för utveckling av ny informationsteknologi. Exempel på framgångsrik svensk forskning inom området återfinns bland annat inom biofysik; lågtemperaturfysik; optisk teknik; magnetism och spinntronik; mesoskopisk fysik; nanovetenskap och nanoteknik; sensorteknik; supraleddning; tunnfilmsteknik; yt- och kolloidfysik.

Tillämpad fysik domineras av laborativ verksamhet men det finns även starka kopplingar till teori och speciellt inom de områden som nämns nedan är samverkan experiment–teori av avgörande betydelse för möjligheten att finnas i forskningsfronten.

## Styrkor och svagheter

Tillämpad fysik har av tradition en stark ställning inom svensk forskning och utveckling vilket även gäller idag. En viktig del av förklaringen till detta faktum är den framgångsrika och populära utbildningen i ämnet (Teknisk Fysik) som tillhandahålls av landets tekniska högskolor och universitet. Sverige har också en tydlig tradition av framgångsrik forskning inom området. Inte minst gäller detta utvecklingen av nya experimentella metoder, ett område där forskningsrönen i flera fall omsatts till utveckling av kraftfulla analysinstrument, exempelvis inom röntgenfotoelektron-spektroskopi (XPS), laserbaserad fjärranalys (LIDAR) och ytplasmonresonans (SPR)-sensorer. Forskningsområdet innefattar verksamhet från ett antal internationellt mycket starka forskningsgrupper distribuerade över många lärosäten och kopplar till center-grupperingar av högsta vetenskapliga klass, t.ex. inom optisk teknik, nanovetenskap, instrumentering, tunnfilmsteknik och nya material såsom grafen.

Området tillämpad fysik karakteriseras av att möjligheten till framgångsrik forskning kräver avancerad och därmed dyr utrustning. Många forskningsprojekt baseras på studier av artificiella komponenter som är komplicerade att tillverka och studera. Mycket av komponentforskningen inom tillämpad fysik kräver till exempel tillgång till avancerade renrum och kostsamma fabrikationsprocesser, exempelvis elektronstrålelitografi. Kostnaden för karakterisering och studier av komponenter och material, exempelvis med hjälp av avancerade mikroskop, optiska system och spektrometrar, kan också vara avskräckande hög. Driften av denna utrustning är ofta kostsam. Historiskt har svensk forskning inom tillämpad fysik kännetecknats av en förhållandevis god tillgång till högteknologisk utrustning, både för provpreparering och för analys. Till exempel är renrummen samlade inom den nationella infrastrukturen MyFab av högsta internationella klass. Rätt förvaltningsarbete ger denna resurs Sverige ett mycket starkt utgångsläge även för framtida utmaningar inom tillämpad fysik.

Det finns i Sverige ett antal viktiga forskningsprojekt som till exempel relaterar till framtagandet av ny instrumenteringsteknik, vilka ofta genererar färre publikationer och citeringar under uppbyggnadsskedet. Då detta är en viktig del av det arbete som krävs för att kunna vara internationellt ledande inom området och är det viktigt att även sådana projekt ska kunna konkurrera om forskningsmedel.

Disputerade med avhandlingar i ämnet tillämpad fysik har ofta fortsatt framgångsrika karriärer inom näringslivet och arbetar då ofta med industriella forsknings- och utvecklingsprojekt. Andra arbetar i mindre innovationsföretag, inom myndigheter, med utbildning etc. Ett relativt fåtal återfinns efter postdoktorsnivån i den akademiska forskningen.

## Trender, utvecklingstendenser och utvecklingspotential

Två vetenskapliga trender som var tydliga redan vid millennieskiftet har förstärkts ytterligare, nämligen nanoteknikens breda intåg inom svensk forskning och det ökande antalet tvärvetenskapliga projekt. Nanovetenskapen är inte minst viktig för utvecklingen av nya komponenter för framtidens informationsteknologi. Exempel på stora svenska satsningar finns inom utvecklandet av så kallade



spinntronska oscillatorer (STO), med unikt stor bandbredd och hög modulationshastighet, supraledande enelektrontransistorer (SET) för ultrasnabb och högkänslig laddningsdetektion inom mesoskopisk fysik, organisk elektronik och materialintegration.

Nanotekniken har också slagit igenom inom utvecklandet av nya biosensorer. Ett exempel är användandet av lokala ytplasmonresonanser (LSPR) i metalliska strukturer för kolorimetrisk detektion av extremt låga koncentrationer av utvalda biomolekyler. Biosensorforskningen är dessutom ett gott exempel på ett fält där framgång knappast är möjlig utan ett tvärvetenskapligt förhållningssätt, i detta fall en kombination av optik, biofysik och ytkemi.

Optik är ett fortsatt starkt forskningsområde där optiska tekniker blir mer tillgängliga och används inom allt fler områden t.ex. för optisk avbildning inom life-science och laserbaserad förbränningsdiagnostik. Vi ser också en stark utveckling av ultrasnabb (fs) spektroskopi för karakterisering av olika material (t.ex. biomaterial) och komponenter. THz-spektroskopi fortsätter att generera god forskning internationellt, ett område där Sverige för närvarande har en något svagare position.

Nya magnetiska material utvecklas t.ex. som ersättningsmaterial för permanentmagneter och magnetiska egenskaper i multilager studeras experimentellt och teoretiskt. Spindynamik används i oscillatorer (STOs) vilket har identifierats av halvledarindustrin som en möjlig komponentstruktur för framtida elektronik. Fältet har stark relevans för ESS genom att detaljerade materialegenskaper kan undersökas där.

Grafen, samt 2D material generellt, är ett område som har ökat markant och där Sverige har skaffat sig en stark position. Området innefattar inte endast direkta applikationer av grafen för nya sensor- och omvandlarteknologier - och för IKT i vidare mening, utan håller också på att breddas till att innefatta nya former av 2D material samt kompositmaterial. Internationellt finns t.ex. ett stort intresse att utforska dessa nya material för att framöver realisera nya komponenter av relevans för IKT.

Det är slutligen uppenbart att samhällets ökade krav på effektivare och mer miljövänlig energiteknik gett allt tydligare avtryck i den svenska forskningsportföljen. Inom området tillämpad fysik är detta tydligt genom stora satsningar på vågkraft och andra, tredje och fjärde generationens kärnreaktorer. Vi kan förvänta oss att denna trend förstärks ytterligare under det kommande decenniet där allt fler projekt har energirelevans av olika grad t.ex. genom inriktningar mot att få fram effektivare solceller.

## Ämnets ställning i Sverige och internationellt

Internationellt spänner området tillämpad fysik (Applied Physics) över ett antal mer eller mindre väldefinierade delområden, ofta med ett tvärvetenskapligt innehåll. Exempel på ämnesområden kan vara instrument och mätteknik, optik, tillämpad supraledning och magnetism, biofysik och biosensorer, nya metoder för mikroskopi och spektroskopi, tunnfilmsteknik, etcetera. I områdesbeskrivningens natur ligger att gränsdragningen gentemot närliggande ämnen och områden inte alltid är självklara eller ens meningsfulla. Historiskt har tyngdpunkten av forskningen varierat något mellan olika ämnesområden beroende på mognadsgrad för de olika teknologierna. Ämnet har en stark ställning internationellt och forskning inom området bidrar till att möjliggöra nya applikationer inom ett antal områden.

Det finns mycket god och framgångsrik forskning i Sverige inom forskningsområdet vid ett antal lärosäten. Som nämnts ovan har grafen och 2D material introducerats tillsammans med nanoteknik och nya komponenter. Optik och magnetism fortsätter att vara framgångsrika områden. Ytterligare exempel på stark forskning inom tillämpad fysik återfinns bland annat inom laserdiagnostik, sensorteknik, komponentfysik, materialutveckling och biologisk avbildning.

## Särskilda behov av forskningsinfrastruktur

De hot och möjligheter som påverkar området tillämpad fysik hänger i mångt och mycket ihop med områdets beroende av avancerad utrustning. Medan finansieringsmöjligheterna för nationell forskningsinfrastruktur ter sig relativt goda är situationen för närvarande besvärlig när det gäller finansiering av lokal så kallad dyr och medeldyr vetenskaplig utrustning sedan universiteten fått ansvaret för finansieringen. Universiteten har, i många fall, ännu inte hunnit finna formerna för hur denna typ av stöd ska fördelas. Detta utgör det potentiellt

största akuta hotet mot området ställning och internationella konkurrenskraft och det är därför av synnerlig vikt att de snabbt hittar stabila finansieringslösningar som är transparenta och långsiktigt hållbara.

På längre sikt är det också värt att uppmärksamma de stora investeringar som görs i de internationella anläggningarna i Lund, MAX IV och ESS samt en eventuell fri-elektronlaser. Dessa har potential att kraftigt stärka svensk forskning inom materialvetenskap och därmed indirekt skapa förutsättningar för framgångsrik forskning inom tillämpad fysik, men det är också viktigt att satsningarna inte dränerar finansieringen av mer småskalig teknisk utrustning och att ESS finansieringen hålls åtskild från övrig statlig forskningsfinansiering såsom utlovats av departementet. En annan aspekt av de storskaliga satsningarna, som även inkluderar annan infrastruktur placerad utomlands (X-FEL, FAIR, LHC med flera) är att dessa ger möjlighet till satsningar på utveckling av accelerators och instrumentering. Denna utveckling har idag ingen naturlig områdesmässig hemvist men passar mycket bra in inom tillämpad fysik.

En ofta försummad aspekt av behovet av utrustning och forskningsinfrastruktur är tillgången på laboratorieingenjörer samt finansieringen av kostnader av drift av laboratorier. En stor del av den utrustning som låg till grund för Sveriges starka ställning inom exempelvis instrument och mätteknik tillverkades eller anpassades vid universitetens egna verkstäder och underhölls av en välutbildad stab av tekniker. Dagens forskning inom tillämpad fysik är till stor del beroende av kommersiellt tillgängliga "mainstream"-instrument, medan underhåll och teknisk utveckling främst utförs av doktorander. Detta förhållande gynnar med största sannolikhet inte Sveriges förmåga att fortsatt ligga i forskningsfrontens framkant inom tillämpad fysik.



Vetenskapsrådet är en myndighet under Utbildningsdepartementet. Vetenskapsrådet har en ledande roll för att utveckla svensk forskning av högsta vetenskapliga kvalitet och bidrar därmed till samhällets utveckling. Utöver finansiering av forskning är myndigheten rådgivare till regeringen i forskningsrelaterade frågor och arbetar för att skapa förståelse för forskningens betydelse, resultat och villkor.

Inom Vetenskapsrådet finns nio ämnesråd, råd och kommittéer. De består av aktiva forskare och andra experter inom respektive område. Varje ämnesråd, råd och kommitté har till sig knutet ett antal beredningsgrupper där forskare bland annat granskar och prioriterar andra forskares ansökningar.

Arbetet inom ramen för Forskningens framtid är en del i Vetenskapsrådets verksamhet för att stödja och stärka forskarinitierad grundläggande forskning, initiera forskning inom strategiskt viktiga områden och verka för ett effektivt forskningssystem. Som forskningspolitisk rådgivare förser Vetenskapsrådet regeringen med underlag för framtida vägval som främjar svensk forskning av högsta vetenskapliga kvalitet och som beaktar forskningen som en del av lösningen på samhällsliga utmaningar. Arbetet genomförs återkommande inför varje forskningsproposition.



Västra Järnvägsgatan 3 | Box 1035 | 101 38 Stockholm | Tel 08-546 44 000 | [vetenskapsradet@vr.se](mailto:vetenskapsradet@vr.se) | [www.vr.se](http://www.vr.se)

Vetenskapsrådet har en ledande roll för att utveckla svensk forskning av högsta vetenskapliga kvalitet och bidrar därmed till samhällets utveckling. Utöver finansiering av forskning är myndigheten rådgivare till regeringen i forskningsrelaterade frågor och deltar aktivt i debatten för att skapa förståelse för den långsiktiga nyttan av forskningen.