

# Digitalisering af lugt: At bygge bro over den sanselige kløft i telekommunikation

Roana de Oliveira Hansen, NanoSYD, Syddansk Universitet

Takket være fremskridt inden for telekommunikation kan vi i dag ubesværet overføre lyd og billeder over store afstande i vores dagligdag. Denne evne har forandret måden, vi forbinder os med hinanden på, og åbner mulighed for at mennesker, adskilt af kontinenter, kan dele samtaler, følelser og oplevelser i realtid. Alligevel er lugtesansen stadig fraværende i den digitale verden. På trods af dens store betydning for vores oplevelser og minder, er det endnu ikke lykkedes fuldt ud at overføre dufte digitalt.

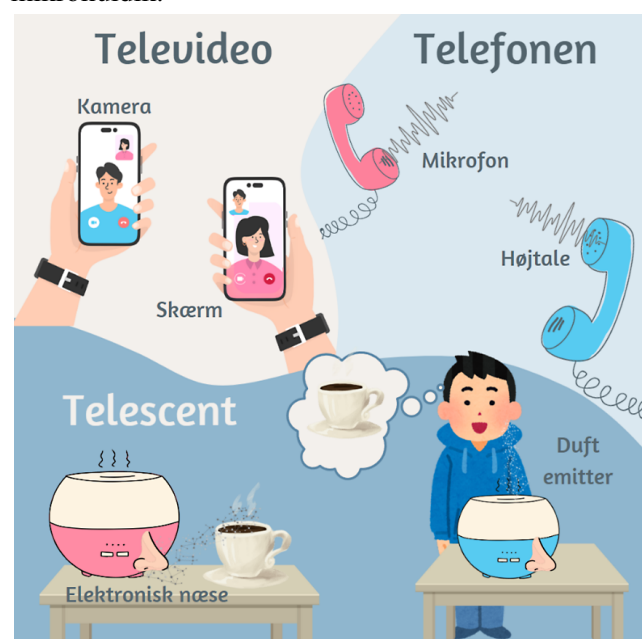
Lugtesansen har en enorm kraft og er tæt forbundet med vores følelser og hukommelse. Den spiller en afgørende rolle i mange aspekter af livet, herunder nydelsen af mad, sikkerhed og personlig trivsel. Men i modsætning til lyd og syn, som effektivt er blevet digitaliseret og transmitteret, udgør lugt stadig en teknologisk udfordring.

Lyd, billede og lugt repræsenterer hver især forskellige sansemodaliteter. Men når de skal overføres via telekommunikation, kan de alle forstås som signaler, der skal opfanges, kodes, transmitteres og genskabes. Lyd består af trykbølger, der varierer i frekvens og amplitude. En mikrofon opfanger disse bølger og omdanner dem til elektriske signaler, som derefter kan blive transmitteret og genskabt som hørbare vibrationer i en højttaler. Denne teknologi danner grundlaget for telefonen. På samme måde består billeder af lysmønstre, der reflekteres fra objekter. Et kamera opfanger dette lys og konverterer det til digitale data, som derefter kan blive transmitteret og genskabt på en skærm som et gitter af pixels – hver med sin farve og lysstyrke – og dermed rekonstruere det oprindelige visuelle billede på en såkaldt *televideo*-enhed.

Selvom lugt kemisk er mere komplekst, følger den tilsvarende logik. Den består af flygtige organiske forbindelser (*Volatile Organic Compounds* – VOC), som spredes gennem luften og binder sig til receptorer i næsen. En elektronisk næse efterligner denne biologiske proces ved hjælp af kemiske sensorer, der opfanger VOC'er og koder deres tilstedeværelse som digitale signaler. I en *telescent*-enhed kan disse digitale signaler blive transmitteret til en modulær duftemitter, som blander lagrede aromastoffer for at genskabe den oprindelige duft. Ligesom mikrofoner og kameraer fungerer som inputenheder for lyd og billede – og højttalere og skærme som output – udgør elektroniske næser og duftemittere et input-output-par for lugtbaseret kommunikation og baner vejen for en ny æra af multisensorisk digital interaktion.

Til forskel fra lyd og billeder, som kan genskabes ud fra veldefinerede fysiske enheder som bølgefrequenser og farvepixels, er lugte komplekse kemiske signaturer uden et universelt system for syntese. Det gør digitaliseringen af lugt til en langt mere indviklet udfordring. Det kræver både præcis kemisk detektion og evnen til at

genskabe duften med høj nøjagtighed – en ambition, der først nu er ved at blive teknologisk mulig takket være fremskridt inden for sensorteknologi, maskinlæring og mikrofluidik.



## Elektroniske næser

“Har du nogensinde målt en lugt? Kan du sige, om én lugt er dobbelt så stærk som en anden? Kan du måle forskellen mellem to slags lugte? Det er tydeligt, at vi har mange forskellige slags lugte – lige fra duften af violer og roser til stanken af asafetida. Men før du kan måle deres ligheder og forskelle, kan du ikke have nogen videnskab om lugt. Hvis du er ambitiøs og vil finde en ny videnskab, så mål en lugt.”

Alexander Graham Bell, 1914

Allerede i 1914 forudså telefonens opfinder, Alexander Graham Bell, at lugt kunne blive genstand for videnskabelig måling og teknologisk udvikling. Siden da er vi kommet langt – især med udviklingen af elektroniske næser, som i dag åbner mulighed for at måle, analysere og genkende lugte digitalt.

I det biologiske lugtesystem binder flygtige molekyler sig til specifikke receptorer i næsen. Disse forskellige receptorer sender elektriske signaler til lugtebulbus (hjernens "duftcenter", som er placeret lige over næsehulen), hvor signalerne behandles og sammenlignes med tidligere oplevelser lagret i hjernen. Det er denne kombination af kemisk sansning og neural mønstergenkendelse, der sætter os i stand til at identificere og skelne mellem tusindvis af forskellige lugte.

Elektroniske næser efterligner denne proces. I stedet for biologiske receptorer anvender de kemiske sensorer, som reagerer på flygtige organiske forbindelser ved at ændre deres elektriske egenskaber. Disse forskellige ændringer omdannes til elektriske signaler, som sendes til en mikroprocessor. Her behandles dataene og sendes videre til et neuralt netværk, hvor maskinlæring anvendes til at genkende mønstre i sensorernes respons. Over tid kan den elektroniske næse trænes til at identificere et bredt spektrum af lugte – præcist og reproducerbart – baseret på det unikke "fingeraftryk", som hver lugt efterlader i sensorarrayet. Ligesom hjernen bruger erfaring og hukommelse til at tolke lugte, bruger den elektroniske næse databaser og algoritmer til at lære og genkende duftprofiler.

### At omsætte kemiske signaler til elektriske output

Elektroniske næser er afhængige af en række forskellige sensorteknologier, som hver især bygger på unikke fysiske principper, for at kunne detektere VOC'er. Disse forskellige teknologier åbner mulighed for at oversætte kemiske interaktioner til elektriske signaler, som kan behandles digitalt og bruges til at identificere og kvantificere lugte.

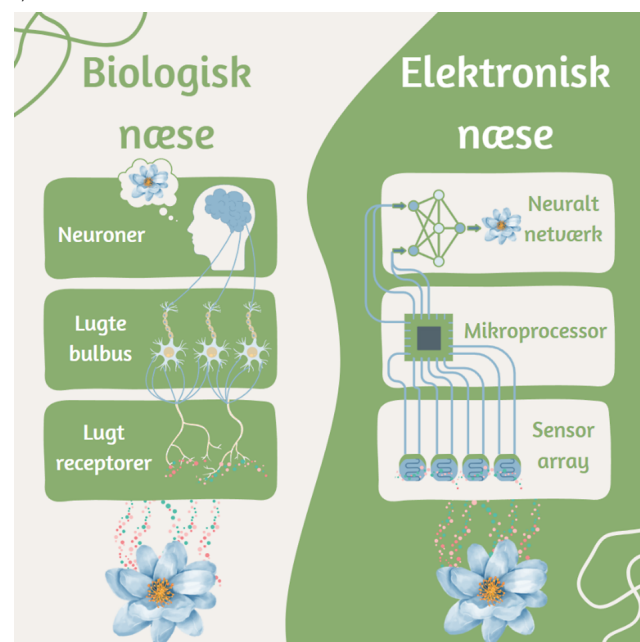
Metaloxid-sensorer fungerer ved at måle ændringer i elektrisk ledningsevne. Når VOC'er interagerer med den opvarmede metaloxidoverflade, donerer eller fjerner de elektroner, hvilket ændrer materialets modstand. Denne ændring registreres som en variation i strøm eller spænding og giver et simpelt, men meget følsomt elektrisk signal. Metaloxid-sensorer er robuste, billige og udbredt i anvendelser som luftkvalitetsmåling og overvågning af fødevarerfordærv.

Piezo-resonator-sensorer, såsom mikrocantilevere og kvarts-krystal-mikrovægtsensorer (*Quartz Crystal Microbalances* – QCM), registrerer ændringer i masse og mekaniske egenskaber. Mikrocantilevere er små, fleksible bjælker, der bøjer eller ændrer deres resonansfrekvens, når molekyler adsorberes på deres overflade. QCM-sensorer anvender en piezoelektrisk kvartskrystal, som oscillerer ved en præcis frekvens. Når VOC'er binder sig til krystaloverfladen, øges massen, hvilket medfører et målbart fald i frekvensen. Da denne frekvensændring er proportional med den adsorbere masse, er QCM-sensorer særligt velegnede til præcis kvantificering af selv meget små mængder af flygtige forbindelser.

Overfladeakustiske bølgesensorer (*Surface Acoustic Waves* – SAW) anvender ligeledes piezoelektriske materialer, men detekterer VOC'er ved at sende akustiske bølger hen over materialets overflade. En interdigital transducer (IDT) genererer disse bølger, som er ek-

stremt følsomme over for ændringer i overfladens masse, elasticitet eller ledningsevne. Når VOC'er binder sig til en funktionaliseret overflade, ændres bølgenes hastighed og amplitude. Disse forskellige ændringer registreres som forskydninger i frekvens eller fase, og omdannes til elektriske signaler, hvilket åbner mulighed for hurtig og følsom detektion af kemiske interaktioner.

Ledende polymersensorer udnytter ændringer i de elektriske egenskaber af organiske polymermaterialer, når de udsættes for VOC'er. Materialer som polypyrrol, polyanilin og polythiofen er naturligt ledende og kan kemisk tilpasses til at reagere selektivt med bestemte forbindelser. Når VOC'er absorberes i polymermatrixen, kan de forårsage svulmning, ladningsoverførsel eller ændringer i dopingsniveauet, hvilket ændrer materialets modstand. Disse forskellige ændringer måles og fortolkes som elektriske signaler, der afspejler både tilstedeværelse og koncentration af målanalytterne. Ledende polymersensorer er attraktive på grund af deres lave omkostninger, fleksible design og kemiske følsomhed.



Optiske sensorer registrerer VOC'er ved at overvåge, hvordan lys interagerer med en funktionaliseret overflade. Afhængigt af designet kan denne interaktion involvere ændringer i lysabsorption, fluorescens, spredning eller brydningsindeks. I absorptionsbaserede sensorer kan VOC'er ændre intensiteten eller bølgelængden af det lys, der absorberes af en farvestofbelagt overflade. Fluorescensbaserede sensorer måler ændringer i lysudsendelse, når VOC'er dæmper eller forstærker fluorescensen. En særlig følsom metode er overfladeplasmonresonans (*Surface Plasmons Resonance* – SPR), hvor lys exciterer elektronoscillationer på en tynd metalfilm. Adsorption af VOC'er ændrer det lokale brydningsindeks, hvilket forskyder resonansbetingelsen og giver mulighed for præcis måling. Disse forskellige optiske teknikker tilbyder enestående specificitet og følsomhed og anvendes bredt i kemisk analyse, miljøovervågning og medicinsk diagnostik.

## Sensorarrays

Disse forskellige sensortyper kan integreres i et samlet sensorarray i en elektronisk næse, hvor hver sensor bidrager med et unikt responsmønster over for en given flygtig forbindelse. Denne konfiguration spejler det biologiske lugtesystem, hvor hundredvis af lugtreceptorer – hver især følsom over for specifikke molekulære egenskaber – arbejder sammen for at danne en kombinationskode, som hjernen bruger til at genkende dufte. I den elektroniske næse samles de elektriske signaler fra hver sensor i et multidimensionelt datapunkt, også kaldet et “duftfingeraftryk”, som sendes videre til en mikrocontroller. Denne mikrocontroller fungerer analogt med lugtebulbus i hjernen og står for at kuratere, forbehandle og fortolke de indkomne signaler ved hjælp af mønstergenkendelsesalgoritmer, så dufte kan identificeres og klassificeres med høj præcision og pålidelighed.

## Træning i duftgenkendelse

Lugtesystemet er aktivt allerede ved fødslen. Et nyfødt barn kommer til verden med et fuldt sæt lugtreceptorer, neurale forbindelser og en lugtebulbus – klar til at opfatte duften af mælk, den blide duft af moderens hud eller den skarpe lugt af en nærliggende blomst. Men selvom barnet kan registrere disse lugte, ved det endnu ikke, hvad de betyder. Genkendelsen kommer med erfaring. Over tid begynder barnet at forbinde den søde duft af mælk med næring, den jordagtige lugt af et tæppe med tryghed, eller den gennemtrængende lugt af fisk med noget ukendt. Disse forskellige associationer opbygges gradvist gennem gentagen eksponering og integration med andre sanseindtryk – syn, berøring, smag og lyd – indtil barnet kan forbinde en bestemt lugt med et specifikt objekt eller en kontekst.

Denne læringsproces i det menneskelige lugtesystem minder om, hvordan en elektronisk næse trænes til at genkende dufte. Selv om den elektroniske næse er udstyret med sensorer i stedet for biologiske receptorer, starter den også med rå perception – den registrerer tilstedeværelsen af flygtige forbindelser uden at vide, hvad de betyder. For at tolke disse signaler anvender den maskinlæring. Når man udsætter systemet for kendte prøver – som duften af modne jordbær, sur mælk eller industrielle opløsningsmidler – lærer enheden at forbinde specifikke sensorresponsmønstre med bestemte lugte. Med tilstrækkelige data og træning kan den efterhånden identificere komplekse duftprofiler med imponerende nøjagtighed.

En stor fordel ved elektroniske næser er deres evne til at kvantificere duftintensitet – noget den menneskelige næse kun vurderer omtrentligt. Hvor vi måske beskriver en lugt som “svag” eller “overvældende”, kan en elektronisk næse måle koncentrationsniveauer præcist og indarbejde disse data i sine genkendelsesalgoritmer. Denne kvantitative evne åbner op for nye anvendelser. For eksempel kan elektroniske næser i fødevarerindustrien overvåge den gradvise opbygning af fordærvelige forbindelser og forudsige holdbarhed

mere pålideligt end visuel inspektion eller menneskelig lugt alene. Til sammenligning er vores biologiske lugtesans, selvom den er rig på nuancer og følelsesmæssig resonans, primært kvalitativ og påvirkelig af træthed, tilvænning og individuelle forskelle.

Når man efterligner strukturen og læringsprocessen i det menneskelige lugtesystem – og samtidig forbedrer det med præcision, konsistens og datadrevet intelligens – bliver elektroniske næser ikke blot detektorer, men forståelsværktøjer, der kan tolke det usynlige kemiske sprog, som omgiver os hver dag.

## TeleScent-projektet

På Syddansk Universitet udforsker vi med Villum Experiment-projektet TeleScent grænselandet for opsamling og transmission af duft. Ligesom telefonen revolutionerede kommunikation ved at åbne mulighed for realtids stemmeudveksling, og fjernsynet ændrede underholdning ved at bringe bevægelige billeder ind i hjemmet, stræber TeleScent efter at tilføje en ny sanselig dimension til digital interaktion: lugt. Når man integrerer duft i virtuelle og udvidede virkeligheder, ønsker TeleScent at gøre fjernoplevelser mere medrivende, følelseladende og livagtige.

Kernen i TeleScent-systemet er dets evne til at digitalisere og genskabe dufte ved hjælp af elektroniske næser og mikrofluidik. Aromastoffer opbevares i modulære beholdere og håndteres som mikrodropletter, der blandes efter behov for at genskabe specifikke dufte. Denne modulære tilgang åbner mulighed for at transmittere og udsende et bredt spektrum af dufte med høj præcision og åbner døren for realtids lugtkommunikation.

Selv om digital dufttransmission stadig befinder sig i en tidlig fase, er potentialet enormt. En af de største udfordringer er at udvikle standardiserede metoder til kodning og afkodning af komplekse duftprofiler – noget lyd- og billedteknologier for længst har mestret. Men udviklingen går hurtigt. Virksomheder som Osmo AI har allerede demonstreret udviklingen af et “odor map” ved hjælp af avancerede teknikker som gaskromatografi-massespektrometri (GC-MS) og kunstig intelligens. Disse forskellige innovationer, kombineret med fremskridt inden for mobilteknologi og kemiteknik, bringer os tættere på en fremtid, hvor duft kan streames lige så let som lyd og video.



Roana de Oliveira Hansen er ph.d. i nanoteknologi og lektor ved Syddansk Universitet i Sønderborg.