

# Summary in Danish

## (Sammenfatning på dansk)

Især i de sidste to årtier er der blevet forsket inden for temporale databaser med det formål at opnå ny indsigt i de forskellige aspekter af håndtering af temporale, eller tids-relaterede, data, samt med henblik på at udvikle nye begreber, værktøjer og teknikker, der bedre understøtter håndtering af sådanne data. Bevæggrundene for meget af denne forskning har været, at de fleste databaser rummer temporale data i væsentligt omfang og at eksisterende databaseteknologi kun i ringe omfang understøtter håndtering af den slags data.

Forskningen inden for temporale databaser kan sammenlignes med dét at samle et stort puslespil, hvor brikkerne i fællesskab beskriver bidrag, der forbedrer understøttelsen af temporale data. Når man samler et almindeligt puslespil, forventer man, at alle brikkerne er tilstede fra starten; og enhver, der har samlet et stort puslespil med manglende brikker, har sikkert gennemlevet de frustrationer, dét kan forårsage. Et forskningspuslespil afviger fra et almindeligt puslespil. Her er det forskernes opgave at opfinde de brikker, der skal bruges, at tilpasse de eksisterende brikker, så de passer sammen, og at eliminere brikker, der viser sig slet ikke at passe i puslespillet. Dermed opstår der et dynamisk og voksende puslespil, der er præget af hastig forandring.

Det seneste årti har forskerne bidraget med brikker til puslespillet i et accelererende omfang, og puslespillet er nu samlet i et omfang, så det klart og konstruktivt illustrerer, at det er muligt at forbedre den understøttelse af temporal data, der findes i de aktuelt anvendte teknologier, væsentligt. For eksempel viser indledende studier, at brug af de temporalt forbedrede spørgesprog, der præsenteres i denne afhandling, kan reducere mængden af programkode til en trediedel i forhold til brug af de sprog, der aktuelt anvendes i praksis. Den begrebslige kompleksitet i applikationsudviklingen reduceres langt mere. Dermed står vi overfor ikke blot en kvantitativ, men en kvalitativ forbedring af effektiviteten, hvormed databaseapplikationer kan udvikles og vedligeholdes.

Denne afhandling præsenterer kernen i forfatterens bidrag til forskellige centrale dele af det temporale databasepuslespil.

## Introduktion

Afhandlingen indledes med et kapitel, der kort introducerer læseren til forskningen i temporale databaser generelt og dermed etablerer en kontekst for de efterfølgende kapitler. Kapitlet definerer kortfattet fundamentale begreber, illustrerer de mangeartede udfordringer til forskningen i temporale databaser, giver eksempler på forskningens resultater og beskriver en mulig fremtid for forskningen.

Afhandlingens efterfølgende kapitler er inddelt i fem dele, og hver del indledes med en kort oversigt over dets kapitler. Desuden rummer hver del temmelig omfattende oversigter over relaterede arbejder.

## Del I: Semantiske Aspekter

Den første del omhandler semantiske aspekter af temporale data. Fokus er på to temporale aspekter af data, kaldet gyldigtid og transaktionstid, på det specielle tidsbegreb *nu* og på mulige betydninger af at knytte forskellige typer af tidsværdier til data. Den forståelse af temporale data, som tilvejebringes i denne del, udgør det begrebslige fundament for de efterfølgende dele.

Hovedparten af forskningen inden for temporale databaser er centreret omkring gyldigtid og transaktionstid. Gyldigtid beskriver, hvornår data er sande i den modellerede virkelighed, og transaktionstid beskriver, hvornår data er en del af databasens såkaldte aktuelle tilstand. Disse indbyrdes uafhængige aspekter af data, også kaldet dimensioner, er fundamentale og er interessante i en bred vifte af anvendelser af databaseteknologi.

Det første af de syv kapitler rummer en oversigt over en stor del af den forskning, som præsenteres i de efterfølgende seks kapitler. kapitlet udforsker betydningen af begreberne gyldigtid og transaktionstid med fokus på især de specialiserede sammenhænge, der kan findes mellem disse aspekter af data i forskellige typer af anvendelser. Det udforsker også betydningen af at knytte flere gyldigtider og transaktionstider til de samme data.

De næste to kapitler bidrager med et omfattende studie af de semantiske konsekvenser af at indføre det aktuelle tidspunkt, beskrevet ved variabelen *nu*, i databaser. Det første kapitel præsenterer et begrebsapparat, der dels gør det muligt at definere meningen af temporale databaser, som indeholder variabelen *nu*, og dels etablerer et semantisk grundlag for at udføre forespørgsler på sådanne databaser; det andet kapitel koncentrerer sig om det at modificere *nu*-relaterede databaser.

Det fjerde kapitel introducerer den bitemporale (dvs. som understøtter både gyldig- og transaktionstid) konceptuelle datamodel. Denne placeres herefter midt i et – punkt-baseret, i det næste kapitels terminologi – system bestående af transformationer, som gør det muligt at udtrykke en models relationer og algebraiske operatører i de andre modeller og dermed bygger bro mellem datamodeller og deres

algebraiske spørgesprog. Det efterfølgende kapitel giver et bud på, hvad det vil sige at et spørgesprog respekterer de tidsintervaller, der ofte knyttes til data. Dermed tilbyder kapitlet et alternativ, imellem opfattelsen af tidsintervaller som kompakte repræsentationer af mængder af tidspunkter og opfattelsen af tidsintervaller som unedbrydelige, atomiske værdier.

Registrering af datas transaktionstid har den effekt, at konventionelle sletninger af data kun har en logisk effekt. Det sidste kapitel omhandler en ny slags fysisk sletning.

## **Del II: Spørgesproget TSQL2**

Det temporale spørgesprog TSQL2 udvider det formelt standardiserede spørgesprog, SQL-92. Del II præsenterer de centrale aspekter af TSQL2, herunder dets underliggende datamodel. Således dokumenterer de 14 kapitler i denne del ét integreret studie i design af temporale spørgesprog. Kapitlerne hidrører fra et unikt og intenst et-årigt initiativ, der havde som mål at designe et konsensus temporalt spørgesprog, som var baseret maksimalt på eksisterende bidrag. Hensigten var at TSQL2 skulle udgøre et fundament for den videre forskning og desuden skulle fungere som forskernes anbefaling til databasevirksomheder med interesse i at bygge temporal understøttelse ind i deres produkter.

Denne del er baseret solidt på det begrebslige grundlag i del I. F.eks. er TSQL2's datamodel baseret på den bitemporale konceptuelle datamodel. Det første kapitel giver en oversigt over TSQL2. Kapitel 12 beskriver datamodellen, og kapitel 15 beskriver kernen i selve spørgesproget. Disse tre kapitler udgør tilsammen et godt grundlag for at læse de øvrige kapitler. De to næstsidste kapitler vedrører ikke selve TSQL2, men beskriver et grundlag for at implementere TSQL2. Det sidste kapitel specificerer TSQL2 som en udvidelse af SQL-92 og bruger SQL-92-standardens beskrivelsesformat.

## **Del III: Temporale datamodeller og spørgesprog**

Del III omhandler også temporale datamodeller og spørgesprog og beskriver resultater af den forskning, der fortsatte, hvor TSQL2 ophørte.

Initiativet, der førte til TSQL2, var begrænset til ét år og omfattede 18 forskere. Disse rammer resulterede i et hektisk forløb, hvor ikke alle aspekter af designet fik tilstrækkelig opmærksomhed. Det første kapitel i denne del påpeger nogle af de resulterende problemer i TSQL2 og skaber også et fundament for nye krav til et temporalt spørgesprog, som peger i retning af et alternativt design. Det næste kapitel definerer en temporal videreføring af det velkendte begreb om bagud kompatibilitet og argumenterer for, at et temporalt spørgesprog og dets datamodel burde understøtte dette. Kapitlet udforsker også konsekvenserne af dette krav og evaluerer alle

eksisterende temporale udvidelser af SQL i forhold til både bagud kompatibilitet og den nye temporale form for kompatibilitet.

Tilsammen etablerer de to første kapitler et fundament for en bedre efterfølger til TSQL2. De næste tre kapitler beskriver én sådan mulig efterfølger: De foreslår et design af SQL/Temporal, der er den del af den nu næsten helt færdige efterfølger til SQL-92 standarden, som er afsat til temporal understøttelse i den nye standard.

Det første af disse tre kapitler giver et overblik over SQL/Temporal, mens de to efterfølgende kapitler er de faktiske, såkaldte "expert contributions", der blev indsendt til standardiseringsorganisationerne. Det ene konfigurerer SQL/Temporal med understøttelse af gyldigtid, mens det andet tilføjer understøttelse af transaktionstid. Tilsammen færdiggør de det billede, som skitseres af det første kapitel. Disse to kapitler omfatter også specifikationer i det specielle formaliserede sprog, der anvendes i forbindelse med SQL-standardisering.

Det sidste kapitel i del III rummer et alternativ, kaldet ATSQL, til SQL/Temporal. Dette alternativ er upåvirket af standardiseringsprocessen, hvilket på visse punkter har resulteret i et renere, men også mere "teoretisk" alternativ. Sammenlignet med SQL/Temporal giver ATSQL bedre understøttelse af formulering af temporale forespørgsler og tillader også formulering af forespørgsler, der samtidig er både interval- og punktbaserede. ATSQL har desuden en formel definition baseret på denotationel notation. På den anden side, så baserer ATSQL sig på mængdebegreber og undgår dermed de komplikationer, der opstår i forbindelse med duplikater; og endelig omfatter ATSQL ikke en række specielle faciliteter, der kan føjes til et temporalt spørgesprog, og som er vigtige i praksis.

Kildeteksten til en implementation af de centrale dele af SQL/Temporal og en kørende prototype-implementationen af de centrale dele af ATSQL er frit tilgængelige via internettet.

#### **Del IV: Design af temporale databaser**

Emnet i del IV, design af databaser med temporale data, er nyt i forhold til de to foregående dele, men bygger også på det semantiske grundlag, der blev fremstillet i del I. De to første kapitler omhandler, hvad der ofte kaldes logisk design og vedrører temporalt udvidede relationelle databaser. De resterende tre kapitler omhandler konceptuelt design, og her er konteksten entitets-relations (ER) modellen.

Udgangspunktet for det første kapitel er, at der allerede findes en veludviklet teori for design af relationelle databaser, som imidlertid ikke umiddelbart kan anvendes i forbindelse med de mange eksisterende, temporalt udvidede relationelle modeller, fordi disse generelt benytter sig af nye typer af (temporalt udvidede) relationer. Efter at have udforsket alle eksisterende temporale normaliseringsbegreber tager kapitlet udgangspunkt i et punktbaseret syn på temporale relationer og generaliserer den eksisterende relationelle teori – afhængigheder og nøgler såvel som

normalformer – til også at omfatte de temporalt udvidede relationelle datamodeller, som tilbyder tidssnit-operationer (hvilket de fleste modeller gør).

Det andet kapitel tager et oplagt næste skridt og bibringer nye begreber, der evner at indfange yderligere temporale egenskaber ved data. Derefter introduceres nye retningslinier for at dekomponere temporale relationer (og konventionelle relationer) baseret på de temporale egenskaber ved deres data.

Det er almindelig praksis at designe et konceptuelt databaseskema ved hjælp af et grafisk værktøj, der anvender en variation af ER modellen, for så derefter at generere et relationelt databaseskema ud fra det konceptuelle skema (et ER diagram). De resterende tre kapitler retter sig mod at bidrage med temporale forbedringer af databasedesign på det konceptuelle niveau og baserer sig på ER modellen. Det første kapitel beskriver og evaluerer som et udgangspunkt de eksisterende temporale ER modeller. Ingen af disse modeller er i sig selv helt tilfredsstillende, og det andet kapitel præsenterer en ny temporal ER model, TimeER, som er designet med udgangspunkt i eksplicite krav og på et ontologisk fundament. Det sidste kapitel dokumenterer en detaljeret afbildning af TimeER diagrammer til relationer med tilhørende integritetsbegrænsninger i dels en surrogat-baseret relationel model og dels den konventionelle relationelle model.

## **Del V: Implementation**

Afhandlingens sidste del udforsker implementation af temporale datamodeller og spørgesprog og bygger ikke kun på afhandlingens anden og tredje dele, men også på den første. Uden en forståelse af de semantiske aspekter af temporale data som beskrevet i del I, ville det ikke have været muligt at opdage flere af de udfordringer, der tages op i denne del. De første kapitler bidrager med effektiv understøttelse af specifikke operationer på temporale databaser, mens de senere kapitler skifter fokus og i stedet omhandler teknikker, der retter sig mod at effektivisere det at implementere temporale spørgesprog i deres helhed.

Det første kapitel beskriver en teknik, der gør det muligt hurtigt at sammenknytte relaterede data fra forskellige gyldigtids-relationer. Denne form for sammenknytning er fundamental i forespørgsler på temporale data, og eksisterende systemer anvender mere simple teknikker, som ofte er ineffektive. Det næste kapitel handler om teknikker til effektivt at finde den tilstand af en transaktionstids-relation, som var (eller er) aktuel på et givet tidspunkt.

De efterfølgende kapitler rummer to komplementære teknikker til indicering af bitemporale data – altså data med både en gyldig- og en transaktionstids-dimension. På grund af deres brug af den specielle variabel *nu* afviger bitemporale data fra andre slags data, med det resultat at ingen eksisterende indiceringsteknikker er i stand til effektivt at indicere bitemporale data. Den første teknik generaliserer R-træet, en indiceringsteknik beregnet til rumlige data, på en måde, der gør det

muligt at håndtere to-dimensionelle bitemporale data, der vokser kontinuerligt. Den anden teknik udfører forskellige transformationer på bitemporale data, med det resultat at den kontinuerlige vækst elimineres, hvorefter det bliver muligt at indicere de transformerede data ved hjælp af fire forskellige R-træer. Med denne teknik må forespørgslerne også transformeres før de anvendes; disse transformationer bevarer forespørgslernes præcision.

De sidste tre kapitler er baseret på den samme motivation og omhandler forskellige aspekter af den samme overordnede udfordring. Dét er konstruere et temporalt database-management-system (DBMS) fra grunden baseret på den overordnede, integrerede arkitektur, der anvendes i konventionelle DBMS'er, er en særdeles omfattende udfordring, der nok kun er en realistisk mulighed for etablerede DBMS producenter. Derfor udforsker de tre kapitler aspekter af en mere realistisk, alternativ arkitektur, nemlig den lagdelte arkitektur. Med denne opnås den temporale understøttelse ved at placere et software-lag, der er en slags avanceret applikation, ovenpå et konventionelt DBMS. Forespørgsler udtrykt i et temporalt SQL oversættes så i laget til det almindelige SQL, som det underliggende DBMS forstår. Arkitekturen gør det muligt at genbruge de avancerede services, det underliggende DBMS tilbyder.

Det første af disse tre kapitler introducerer begreber og teknikker, der er centrale i den lagdelte arkitektur. Det næste præsenterer en taksonomi indeholdende en række forskellige lagdelte arkitekturer, beskriver disses styrker og svagheder, og giver eksempler på deres anvendelser. Det sidste kapitel omhandler specifikt samspillet mellem de tidsværdier, transaktioner knytter til data, og det at understøtte bruger-transaktioner. Hvis tidsværdierne ikke vælges med omhu, så kan bruger-transaktioner resultere i at der opstår "umulige", eller inkonsistente, databasetilstande. Kapitlet præsenterer teknikker rettet mod at opnå ligefrem, konsistent og effektiv understøttelse af dét at modificere bitemporale databaser i sammenhæng med bruger-transaktioner.

### **Opsummering af sammenfatningen**

Afhandlingens fem dele dækker fire emner: (i) semantiske aspekter af temporale data, (ii) design af temporale datamodeller og spørgesprog, (iii) design af databaser udtrykt i temporale datamodeller og temporalt forbedret design af databaser udtrykt i den konventionelle relationelle model samt (iv) implementation af temporale datamodeller og spørgesprog.

Det er forfatterens håb, at læseren vil se mangeartetheden af de brikker, afhandlingen bidrager med til det temporale databasepuslespil, men også samtidig vil finde de røde tråde, der får de enkelte brikker til at falde på plads blandt hinanden og blandt brikker, der skyldes andre forskere.