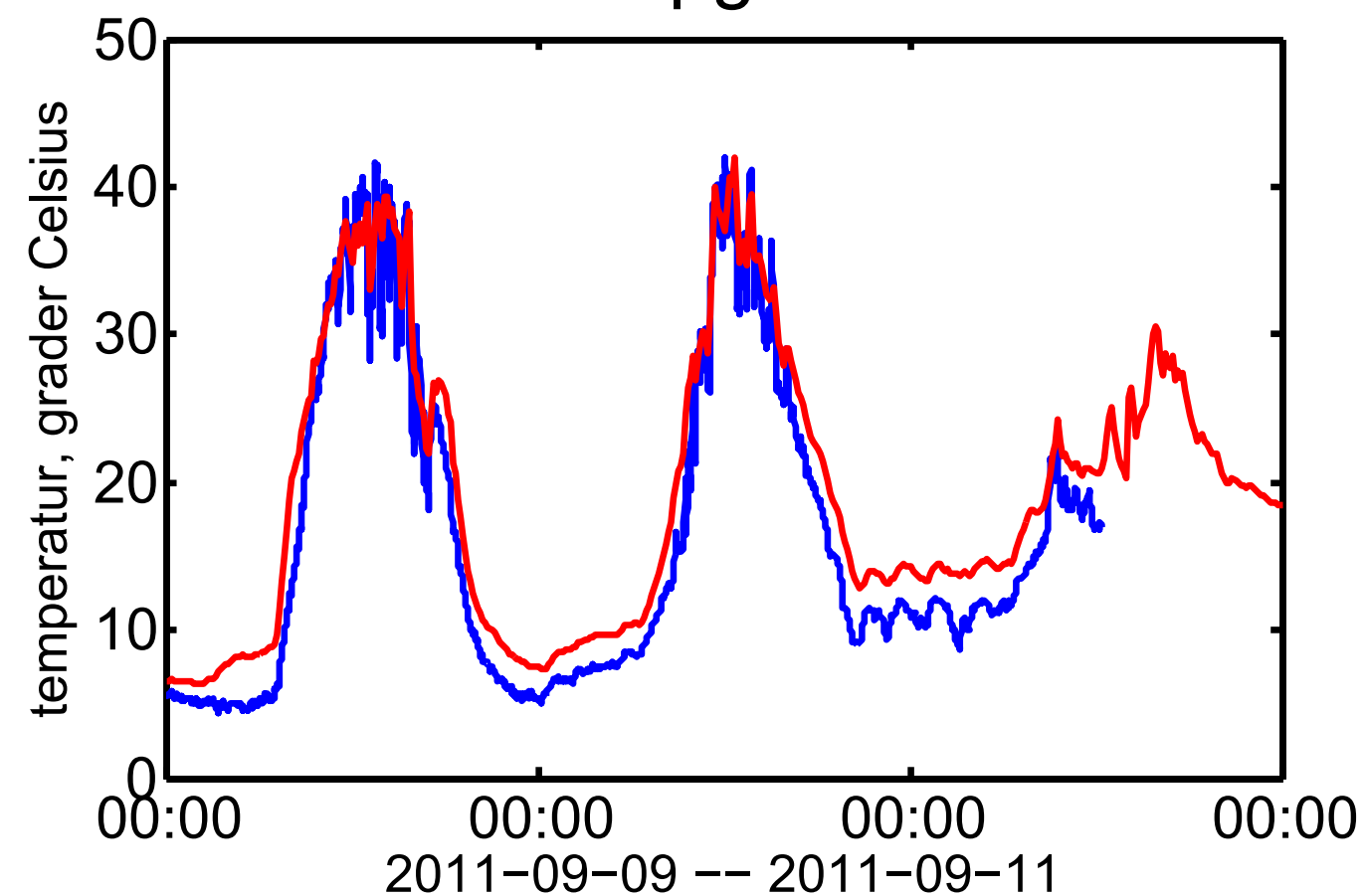


JAN FAGERSTRÖM, NILS KARLSSON,
ROLAND LINDELL OCH JONAS RAHM

tak tempgivare #2



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

Jan Fagerström, Nils Karlsson, Roland Lindell och
Jonas Rahm

Metod för modellering av IR- signatur för fordon

Mätningar och beräkningar

Titel	Metod för modellering av IR-signatur för fordon. Mätningar och beräkningar.
Title	A method for modeling of the IR signature of vehicles. Measurements and calculations.
Rapportnr/Report no	FOI-R--3591--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2012
Antal sidor/Pages	30 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FM
FoT område	Sensorer och signaturanpassning
Projektnr/Project no	E54017
Godkänd av/Approved by	Martin Rantzer
Ansvarig avdelning	Sensorer och TK-system

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk. All form av kopiering, översättning eller bearbetning utan medgivande är förbjuden.

This work is protected under the Act on Copyright in Literary and Artistic Works (SFS 1960:729). Any form of reproduction, translation or modification without permission is prohibited.

Sammanfattning

I tidigare arbete inom projektet har validering av termiska och radiometrisk beräkningar mot mätdata utförts genom att studera enkla, väldefinierade, generiska objekt. I denna studie presenteras en metod för modellering av termiska egenskaper och IR-signaturegenskaper hos realistiska och mer komplicerade objekt. Metoden tillämpas på en Volvo V70, men kan användas på andra objekt som t.ex. militära fordon. För att få referensdata utfördes temperaturmätningar på ett antal positioner på fordonet, samt även radiansmätningar. Radiansen mättes i de två våglängdsbanden 2,8-5 μm och 7,5-14 μm . Väderdata samlades in med väderstation. Bilens position var fixerad men dess orientering varierades och motorn var igång en timme varje mättygn. Temperatur och radiansegenskaper beräknades. Som indata till beräkningarna används en CAD-geometri och materialdata för både termiska och optiska egenskaper.

Många parametrar i beräkningsmodellen är relativt grovt uppskattade. Med detta i åtanke visar resultaten på en överlag god överensstämmelse mellan beräknade och uppmätta värden både avseende temperatur och radians. Det finns dock avvikelser, vilka diskuteras i rapporten. Vi ger flera förslag till fortsatt arbete för att utveckla och förfinas termisk modellering och signaturmodellering av komplexa objekt, bland annat genom förbättrad karakterisering av materialegenskaper och geometri.

Nyckelord: Termisk beräkning, temperaturmätning, IR-modellering, signaturmodellering, IR-mätning, signaturmätning, LWIR, SWIR, RadThermIR.

Summary

In previous work in the project validation of thermal and radiometric calculations against measured data was carried out by studying simple, well defined generic objects. The present study presents a method to model thermal properties and infrared signature properties of realistic and more complex objects. The method is applied to a Volvo V70, but could be used for military vehicles as well. Reference data for validation was collected by measuring the radiance, as well as the temperature at a number of positions on the vehicle. The radiance was measured in the wave length bands 2.8—5 μm and 7.5—14 μm . Weather data was collected using a weather station. The position of the vehicle was fixed but its orientation was varied and its engine was left running one hour each day. Temperature and radiance were calculated. As input to the calculations a CAD-geometry in combination with thermal and optical material data were used.

Many of the parameters in the model are only roughly estimated. With this kept in mind, the results show an overall good agreement between calculated and measured values in terms of both temperature and radiance. However, discrepancies exist, and are discussed in the report. Several suggestions of further work to improve modeling of thermal modeling and infrared signature modeling of complex objects are given, for example improved material characterization and geometrical description.

Keywords: Thermal calculation, temperature measurement, IR modeling, signature modeling, IR measurement, signature measurement, LWIR, SWIR, RadThermIR.

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Objekt för modellering och jämförande mätningar	8
3	Mätningar	9
3.1	Mätningar av temperatur	10
3.2	Mätningar av radians	11
3.3	Mätningar av väder och strålning	11
4	Beräkningsmodell	14
4.1	Mjukvara	14
4.2	Geometrisk modell	14
4.3	Termiska bulkegenskaper	15
4.4	Termiska ytegenskaper: Emissivitet och absorptivitet	15
4.5	Optiska ytegenskaper: BRDF	16
4.6	Reflektivitetmätningar med handhållen utrustning	18
5	Resultat	22
5.1	Temperatur	22
5.2	Radiansbilder	25
6	Slutsatser	29
7	Referenser	30

1 Inledning

I projektet Plattformssignaturer har vi under flera år arbetat med signaturanalys, både inom radar- och infraröd- (IR-) området. För IR-området har vi i ett antal studier [1][2] arbetat med analys av ett generiskt markobjekt, CUBI. Det arbetet har innehållit framtagning och tillverkning av mätobjektet (CUBI), utveckling av mätmetodik, genomförande av mätningar (optisk materialkaraktisering, termiska och radiometriska mätningar), uppbyggnad av beräkningsmodeller, utveckling av metoder för att ta fram beräkningsparametrar från mätdata, samt genomförande av termiska och radiometriska beräkningar av CUBI under verkliga och väl karakteriserade förhållanden. Arbetet har lett till validering av modellen, samt att vi identifierat många möjligheter och en del begränsningar med de IR-simuleringar vi studerat. Vi har även fått kunskap om hur starkt olika inparametrar påverkar beräkningsresultatet.

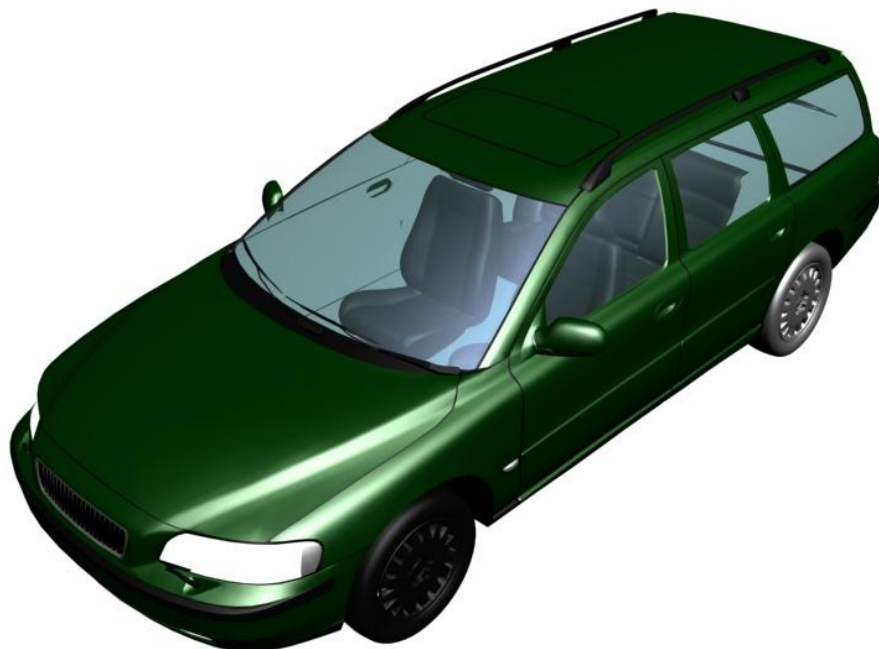
I föreliggande studie tillämpar vi de tidigare utvecklade metoderna på en Volvo V70 personbil. Metoden är direkt applicerbar på militära fordon. Syftet är att testa och etablera metoden för realistiska och komplicerade objekt. Arbetsgången är densamma som i tidigare studier, och detaljerna beskrivs utförligt i rapporten. Sektion 1 ger en bakgrund till arbetet. I sektion 2 presenteras det civila fordonet som analyseras. Sektion 3 och 4 beskriver mätmetoderna respektive beräkningsmetoderna som använts i studien. I sektion 5 presenteras och jämförs mät- och beräkningsresultaten. Slutligen innehåller sektion 6 studiens slutsatser.

2 Objekt för modellering och jämförande mätningar

Som objekt för de termiska beräkningarna och mätningarna används en civil personbil, en röd Volvo V70, 2,4L av årsmodell 2004, se Figur 1. En CAD av Volvo V70 används för beräkningarna, se renderad bild i Figur 2.



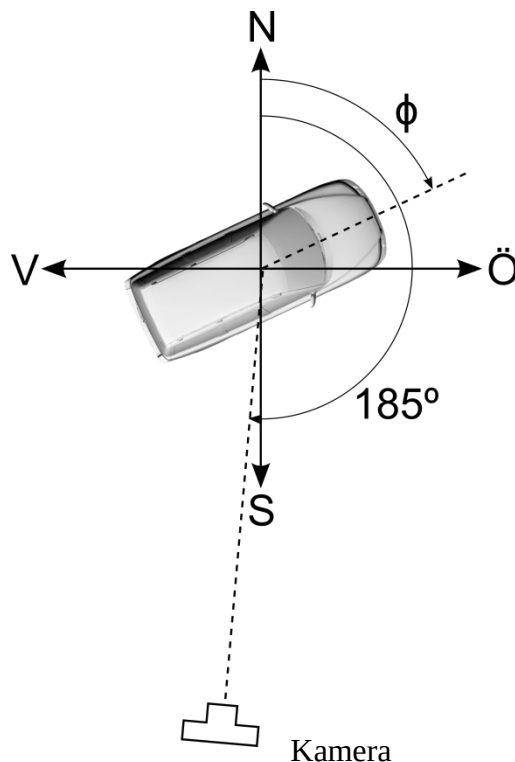
Figur 1. Bild på fordonet (Volvo V70) som användes vid mätningarna.



Figur 2. Renderad bild gjord från CAD-modell av Volvo V70.

3 Mätningar

Personbilen karakteriserades med temperatur- och radiansmätningar varje minut under cirka 6 dygn. Samtidigt loggades väder, solinstrålning och långvågig strålning. Mätförfarandet var att mäta bilen i en aspektvinkel per dygn samt att vid ett tillfälle under varje dygn starta bilen och låta den gå på tomgång i ca 1 timme. Bilen startades cirka klockan 09:00 varje dygn. När motorn gick på tomgång var AC:n i bilen inställd på "Auto" 22 °C, det vill säga kupétemperaturen borde hålla sig runt 22 °C. Direkt efter att tändningen slagits av, har en vridning av vridbordet utförts. Vinklarna är definierade för bilens framåtriktning, medsols relativt nordlig riktning, se Figur 3.



Figur 3. Definition av kamerornas position och bilens vridningsvinkel ϕ relativt väderstrecken.

Mätningarna startade 2011-09-06 med att bilens nos riktades rakt mot IR-kamerorna ($\phi = 185^\circ$). Tabell 1 ger en överblick av tider och händelser under mätningarna, och även när simuleringarna börjar och slutar. Mätningar utfördes med bilen vriden vinklarna $\phi = 185^\circ, 125^\circ, 65^\circ, 215^\circ$ (som motsvarar vinklarna $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ och -30° relativt kamerans position). Kamerans position var densamma under hela mätningarna (185° relativt nordlig riktning, se Figur 3). Den sista vinkelinställningen mättes under flera dygn (helgen 2011-09-09 till 2011-09-12) utan tomgångskörning. Som kalibreringsobjekt till IR-bilderna användes en tratt med temperaturgivare i avslutningen. Kamerorna ser trattens avslutning där den absoluta temperaturen registrerades varje minut. Trattens temperaturregistrering startades först 2011-09-07 ca klockan 08:30.

Tabell 1. Händelselogg: Start / stopp av motor, vridning av fordonet, samt start / stopp av simulering.

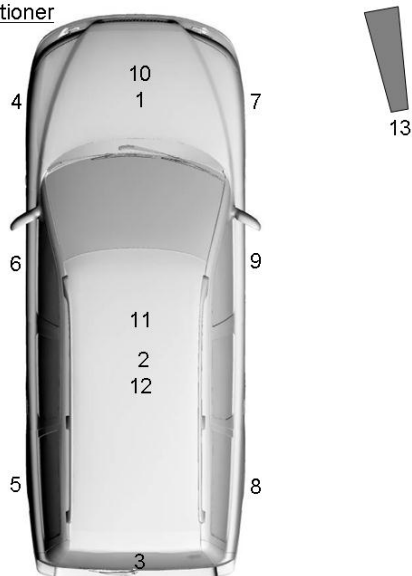
Datum	Klockslag	Händelse	Position (ϕ)
2011-09-06	11:52	Start mätning	185°
2011-09-07	09:00	Start motor	185°
2011-09-07	10:06	Stopp motor	185°
2011-09-07	10:10	Vridning -60°	125°
2011-09-08	08:57	Start motor	125°
2011-09-08	10:00	Stopp motor	125°
2011-09-08	10:08	Vridning -60°	65°
2011-09-09	00:00	Start simulering	65°
2011-09-09	08:55	Start motor	65°
2011-09-09	10:00	Stopp motor	65°
2011-09-09	10:35	Vridning 150°	215°
2011-09-12	00:00	Stopp simulering	215°
2011-09-12	12:10	Stopp mätning	215°

3.1 Mätningar av temperatur

Temperaturgivare (Pt100) monterades på olika ytor och ställen på V70:n, se Figur 4. Temperaturen loggades varje minut tillsammans med data från en närbelägen väderstation. Temperatur-loggern placerades i bilen.

Ungefärliga temperaturpositioner

1. Motorhuv
2. Tak
3. Baklucka
4. V. fram hjulhus
5. V. bak hjulhus
6. V. fram dörr
7. H. fram hjulhus
8. H. bak hjulhus
9. H. fram dörr
10. Luft motorutrymme
11. Kupeluft
12. Markiso. under bil
13. Trattavslutning



Figur 4. Temperaturgivarnas numrering och placering.

3.2 Mätningar av radians

För att mäta (den emitterade) radiansen på mätobjektet användes Agema Thermovision System 900 [3]. Detta system består av två skannande värmekameror, Agema 900SW och Agema 900LW och en datainsamlingsenhet Agema 900 system controller. Agema 900SW mäter inom våglängdsbandet 2,8-5,0 μm och Agema 900LW mäter inom våglängdsbandet 7,5-14 μm . Det emitterade våglängdsspektrumet från solen i kombination med atmosfärens transmissionsegenskaper visar att det finns våglängder inom området 2,8 – 3,4 μm som ”när” ner till jordytan, se referens [4]. Dessa våglängder kan i sin tur reflekteras mot t ex fordonets ytor och mätas in med SW-kameran. Man får därav en komponent i radiansbilderna som härrör från direkt- och/eller reflekterad strålning från solen. För att förhindra detta och så långt som möjligt mäta den emitterade radiansen från fordonet, använder vi ett bandpass filter på Agema 900SW-kameran. Filtret släpper igenom våglängder i området 3,4 – 5,0 μm . Bildstorleken för kamerorna är 272x136 pixlar med ett bilddjup 12 bitar. Vid mättillfällen användes linser med $20^\circ \times 10^\circ$ synfält.

3.3 Mätningar av väder och strålning

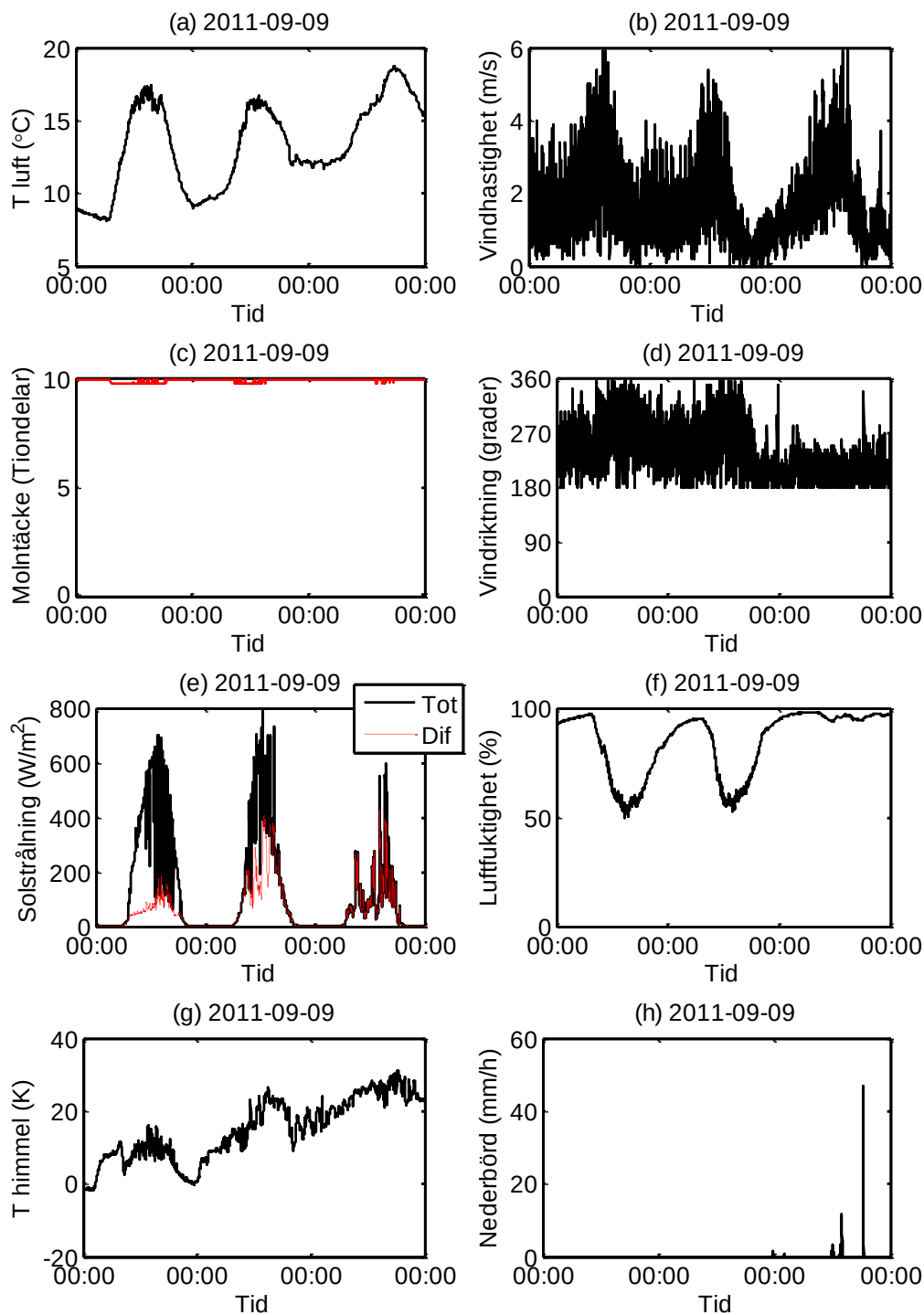
En väderstation VAISALA Milos 500 [5] används för att mäta upp relevanta väderparametrar, se Figur 5. Väderparametrarna används som indata till beräkningarna av ytemperaturer och radiansbilder. De väderparametrar som mäts upp är:

- Vindriktning
- Vindhastighet
- Lufttemperatur
- Luftfuktighet
- Sikt
- Nederbörd
- Solinstrålning 305-2800 nm
- Markstrålning 305-2800 nm
- Himmelstrålning 3,5-50 μm
- Markstrålning 3,5-50 μm
- Marktemperatur

Dessutom kompletterades väderstationen med ytterligare en solinstrålningssensor (Delta-T SPN1). Denna sensor mäter den totala samt den diffusa delen av solinstrålningen inom våglängdsområdet 305-2800 nm. Väderparametrarna för de tre dygnet som simuleras presenteras i Figur 6.



Figur 5. Väderstation VAISALA Milos 500 i förgrunden.

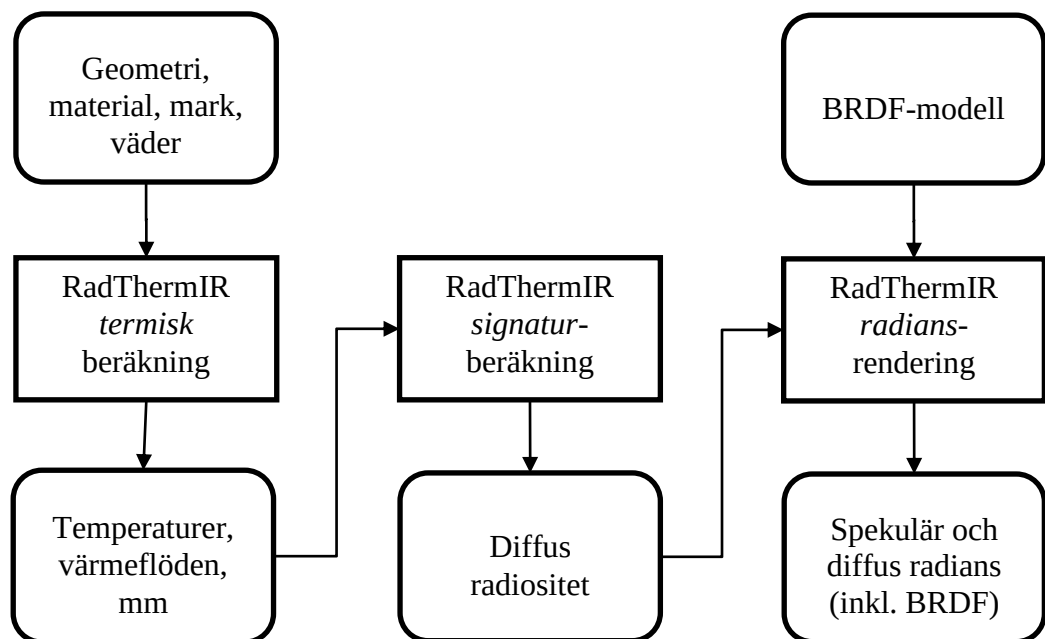


Figur 6. Uppmätta väderparametrar för dygnen 2011-09-09—11. Dessa väderparametrar är indata i beräkningarna med RadThermIR.

4 Beräkningsmodell

4.1 Mjukvara

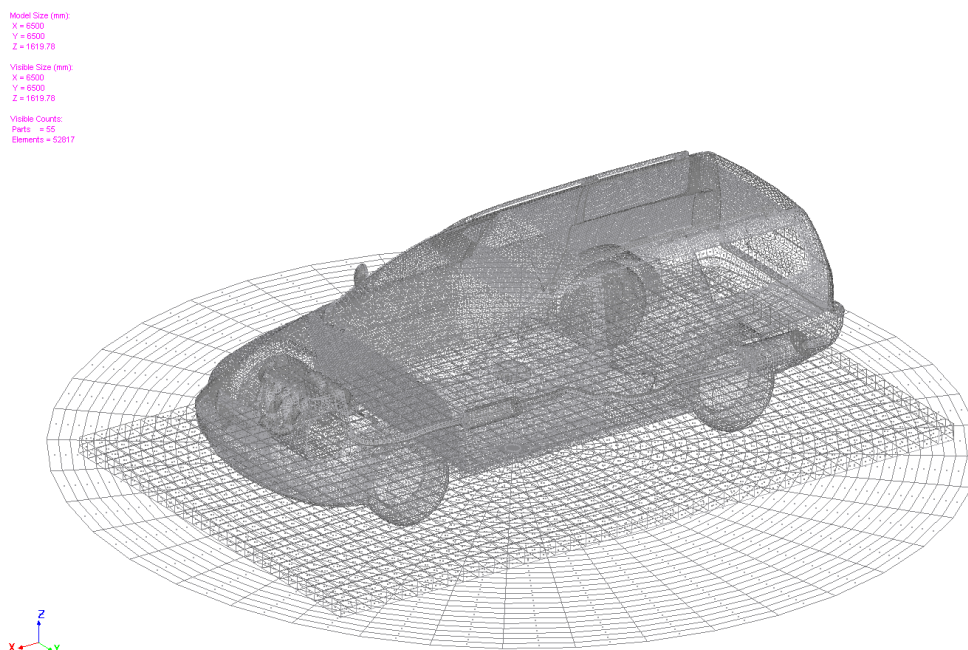
Vi har beräknat temperaturer och radiansegenskaper för personbilen med hjälp av mjukvaran RadThermIR [6]. Dataflödet i RadThermIR illustreras i Figur 7. För att utföra de termiska beräkningarna i RadThermIR krävs följande materialegenskaper för alla material i modellen: densitet, termisk konduktivitet, specifik värmekapacitet, solabsorptivitet och termisk emissivitet. För att beräkna radiansegenskaperna för de synliga ytorna krävs dessutom Sandford-Robertson BRDF-parametrar. Alla materialegenskaper och hur de tagits fram presenteras i följande avsnitt.



Figur 7. Schematisk beskrivning av dataflödet i RadThermIR. Lådor med rundade hörn visar in- och utdata, kantiga lådor visar beräkningstyp i RadThermIR.

4.2 Geometrisk modell

Figur 8 visar den geometriska modellen som använts i RadThermIR-beräkningarna. Förutom personbilen syns markisoleringen och vridbordet. Geometrin är uppbyggd av 52817 ytelement.



Figur 8. Geometri för personbilen som använts för simuleringarna i RadThermIR.

4.3 Termiska bulkegenskaper

Termiska materialparametrar för de material som använts i beräkningarna i RadThermIR redovisas i Tabell 2. Dessa är samtliga standardmaterial i RadThermIR. Vi har alltså inte mätt upp fordonets materialegenskaper.

Tabell 2. Termiska materialparametrar för bulkmaterialen i RadThermIR.

Material	Placering	Densitet	Termisk konduktivitet	Specifik värmekapacitivitet	Reflektans	Transmittans
Stålplåt	Kaross	7768,98	52,019	460,968		
Plast	Baklucka Motorhuv	913,05	0,395	2301		
Gummi	Däck	961,031	0,1558	2011,34		
Plast	Lister	1150	0,23	1970		
Glas	Rutor	2529,6	1,1717	754,04	0,08	0,76

4.4 Termiska ytegenskaper: Emissivitet och absorptivitet

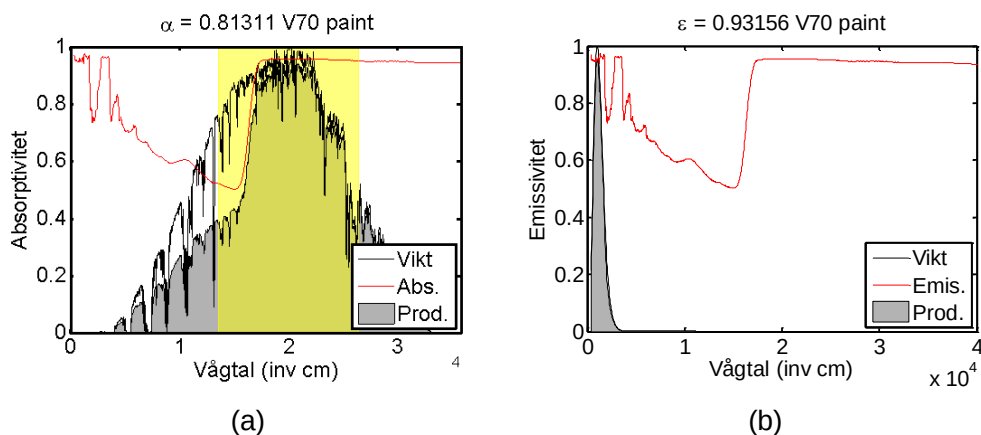
Utsidan på fordonet består till största delen av en röd lack som karakteriserats optiskt med flera metoder: DHR ("Directional Hemispherical Reflectance") och BRDF ("Bi-Directional Reflectivity Distribution Function"). Dessa mätmetoder, och metoderna för att bestämma materialparametrarna, har beskrivits tidigare, se [1]. För att mäta DHR och BRDF i spektrometrar tillverkades en provbit av plåt som lackerats med bättringsfärg avsedd för fordonet.

Den termiska solabsorptiviteten α och termiska emissiviteten ε beräknas som viktade medelvärden av motsvarande spektrala egenskaper, se Figur 9. De spektrala funktionerna (röda kurvor i Figur 9) uppskattas från uppmätt, spektral total DHR $\rho(\lambda)$:

$$\alpha(\lambda) = 1 - \rho(\lambda) \quad (1)$$

$$\varepsilon(\lambda) = 1 - \rho(\lambda) \quad (2)$$

För de termiska beräkningarna i RadThermIR bestämdes solabsorptiviteten α och termiska emissiviteten ε för den röda lacken som viktade medelvärden av motsvarande spektrala parametrar. Den spektrala absorptiviteten $\alpha(\lambda)$ viktas med ett standardiserat solspektrum[7], och den spektrala emissiviteten $\varepsilon(\lambda)$ viktas med spektrumet för en svartkropp vid rumstemperatur (300 K). Spektrumet och de viktade medelvärdena redovisas i Figur 9. I Tabell 3 sammanfattas de termiska ytparametrarna som använts i beräkningarna. För gummi och svart plast användes värden från databasen i RadThermIR.



Figur 9. (a) Absorptivitet (viktad med solens spektrum vid markytan) och (b) emissivitet (viktad med svartkroppsspektrum vid rumstemperatur) för fordonets röda lack. Svarta kurvor är viktfunktionen, röd kurva är den spektrala absorptiviteten respektive emissiviteten, och kurvan med skuggad yta är produkten av absorptivitet / emissivitet och respektive viktfunktion. Det gula området i (a) markerar det synliga våglängdsområdet.

Tabell 3. Termiska, optiska parametrar för ytorna i RadThermIR.

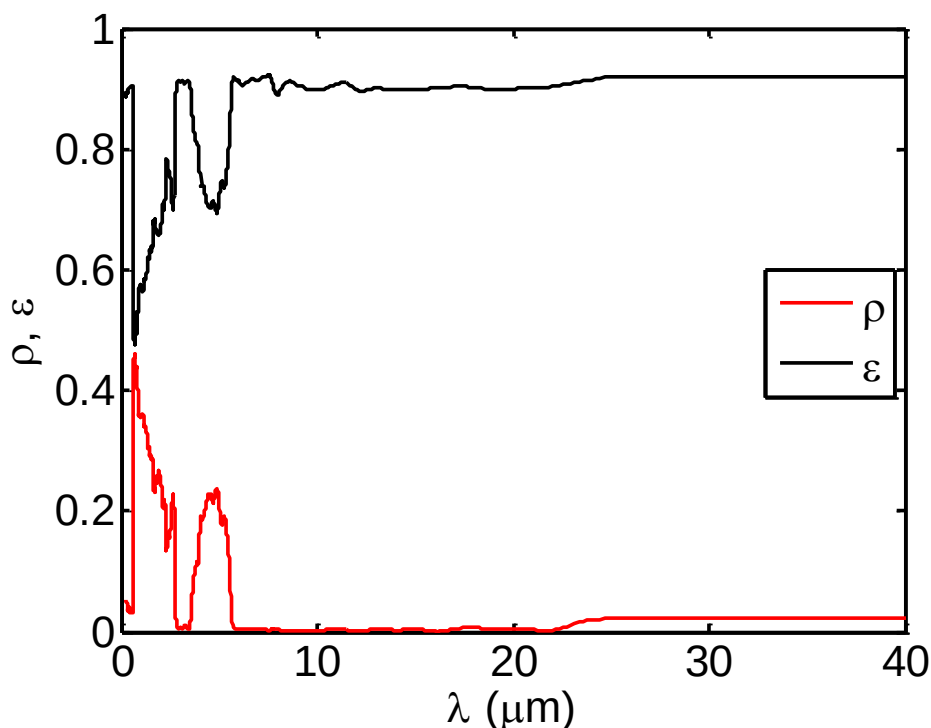
Yta	Placering	Solabsorptivitet och termisk emissivitet
Röd lack	Utsida kaross	$\alpha = 0,81311$ $\varepsilon = 0,93156$
Gummi	Däck	$\alpha = 0,73$ $\varepsilon = 0,92$
Svart plast	Lister	$\alpha = 0,93$ $\varepsilon = 0,92$

4.5 Optiska ytegenskaper: BRDF

För att beräkna radiansbilder i RadThermIR så behövs en beskrivning av den synliga ytans BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function), särskilt om ytan har kraftig

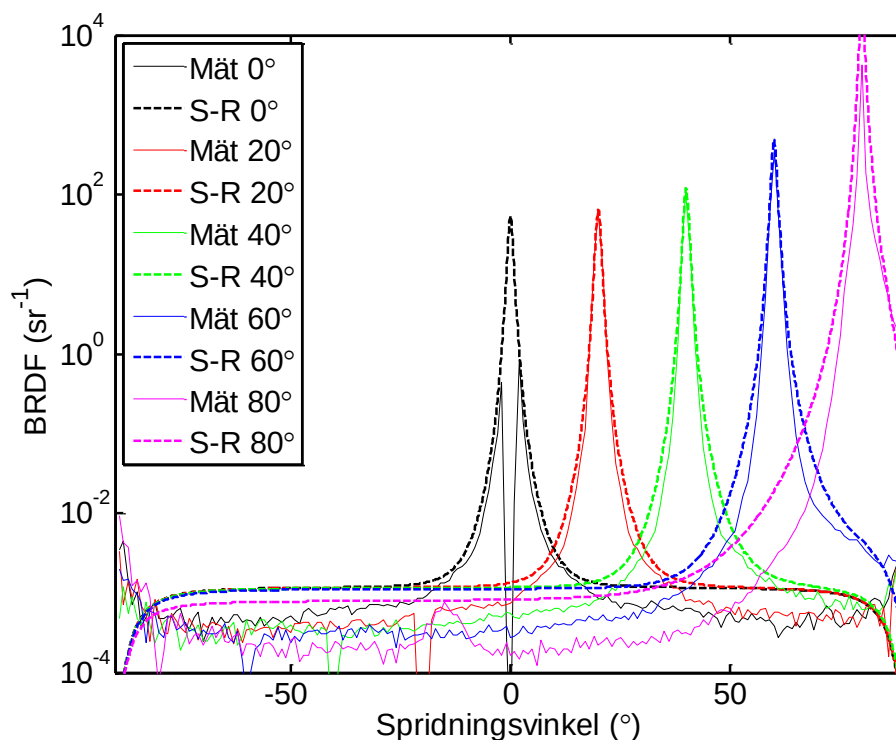
spekulär reflektans. (Det är också möjligt att beräkna approximativa, helt diffusa, radiansegenskaper utifrån det viktade medelvärdet av emissiviteten.) I RadThermIR används Sandford-Robertson-modellen[8] för att beskriva BRDF. Vi har bestämt Sandford-Robertson-parametrarna för den röda lacken från mätningar av BRDF och DHR (Directional Hemispherical Reflectance). Metoden för att ta fram parametrarna beskrivs i detalj i Referens [1]. För att mäta BRDF för den röda lacken användes en "TMA TASC Polarometric Scatterometer" [1]. Ljuskällan var en HeNe-laser (våglängd $3.39\ \mu\text{m}$). Utrustningen och mätmetodiken har beskrivits tidigare, se Referens [1]. Sandford-Robertson-parametrarna för den röda lacken är:

- Fresnel-koefficienten $b=0.1251$
- Spekulär lobbredd $e=0.0071165$
- Spektral diffus reflektivitet, se Figur 10 (röd kurva).
- Spektral emissivitet, se Figur 10 (svart kurva).



Figur 10. Diffus reflektivitet och emissivitet i RadThermIR "paint"-filen för den röda lacken som används på V70.

I Figur 11 jämförs beräknad Sandford-Robertson-BRDF (streckade kurvor) med uppmätt BRDF (heldragna kurvor). Spektrumen gäller i infallsplanet för våglängden $3.39\ \mu\text{m}$, vid ett antal olika infallsvinklar. Sandford-Robertson-modellen ger något för breda spekulära toppar och något för hög diffus nivå vid $3.39\ \mu\text{m}$. Avvikelsen beror delvis på att modellen är en kompromiss som ska gälla i hela våglängdsområdet ($250\ \text{nm} - 25\ \mu\text{m}$).



Figur 11. BRDF för den röda V70-lacken, dels uppmätt (streckade kurvor), dels parametriserat med Sandford-Robertson-parametriseringen (heldragna kurvor). Kurvorna gäller vid våglängden 3.39 μm , och för spridning i infallsplanet. (Den uppmätta spekulära loben har en kraftig dip vid 0° infallsvinkel som beror på att detektorn skymmer ljuskällan i mätupställningen.)

4.6 Reflektivitetsmätningar med handhållen utrustning

Den röda lackens totala reflektivitet på bilen och på provbiten mättes även med två portabla, handhållna DHR-mätare [9], [10]. Den handhållna utrustningen användes för att mäta reflektansen för både IR-området (0.9—12 μm) [10] och för vis—NIR-området (0.3—2.5 μm) [9]. Inom varje våglängdsområde mäts reflektansen integrerat inom ett antal delband. Delbanden sammanfattas i

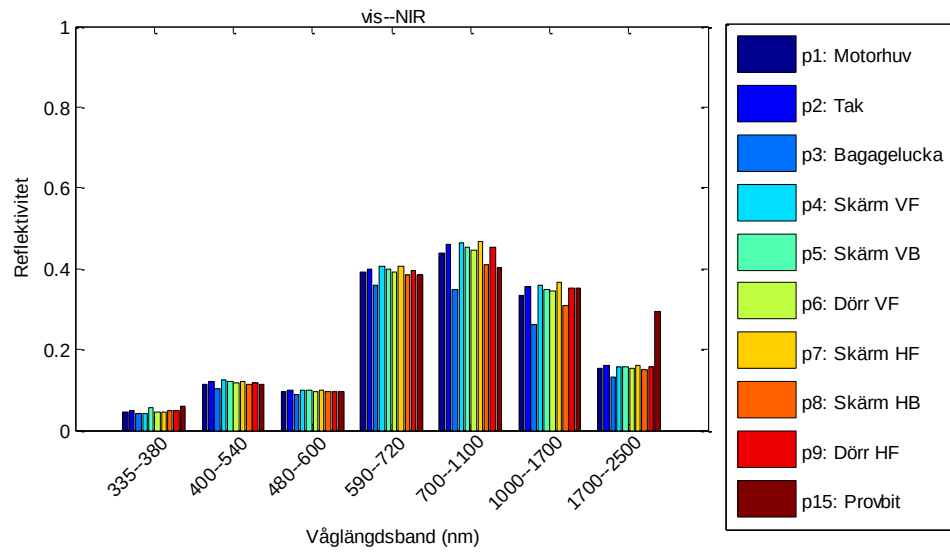
Tabell 4. Den handhållna utrustning är portabel vilket ger möjlighet att mäta reflektans för specifika ytor på till exempel fordon, även i fält. Man kan även enkelt mäta på flera punkter för att få med eventuella skillnader på olika delar av fordonet. Med de handhållna DHR-mätarna uppmättes reflektansvärden på totalt 13 punkter på bilen (se Tabell 5). Punkterna har samma numrering som används för temperaturgivarna (se Figur 4). I IR-området mättes reflektansen för två infallsvinklar (20° respektive 60°); i vis—NIR-området mättes reflektansen endast vid infallsvinkeln 20°. Som en jämförelse uppmättes reflektansen även för provbiten med den handhållna utrustningen (mät punkt 15 i Tabell 5 och i Figur 12—Figur 14). Resultaten från mätningarna med den handhållna utrustningen presenteras i Figur 12—Figur 14. Mätresultaten visar att just provbiten ger något avvikande värden, speciellt i det icke visuella området.

Tabell 4. Våglängdsband för de handhållna DHR-mätarna.

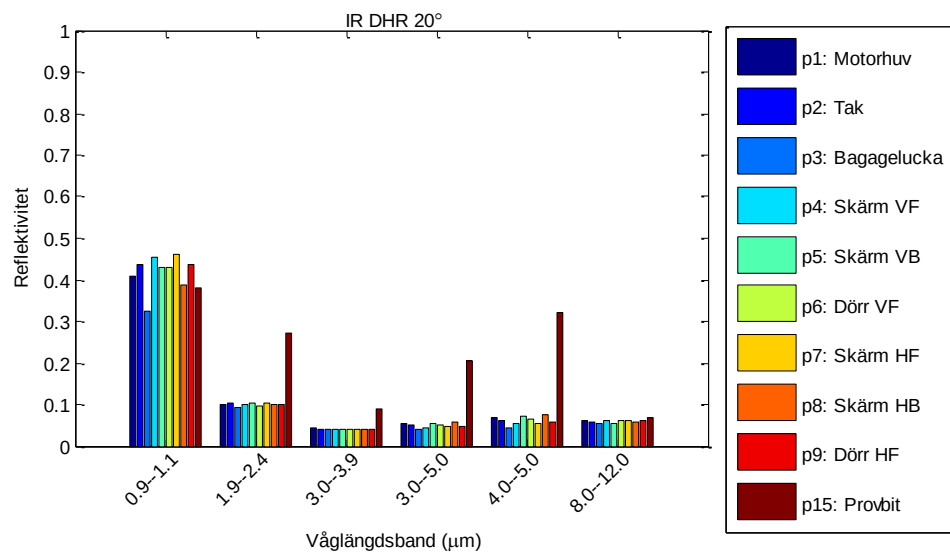
SOC 410-Solar Våglängdsband VIS-NIR [nm]	SOC 410-IR Våglängdsband IR [µm]
335—380	0.9—1.1
400—540	1.9—2.4
480—600	3.0—3.9
590—720	3.0—5.0
700—1100	4.0—5.0
1000—1700	8.0—12.0
1700—2500	

Tabell 5. Mätpunkter på personbilen för mätningarna med de handhållna DHR-mätarna.

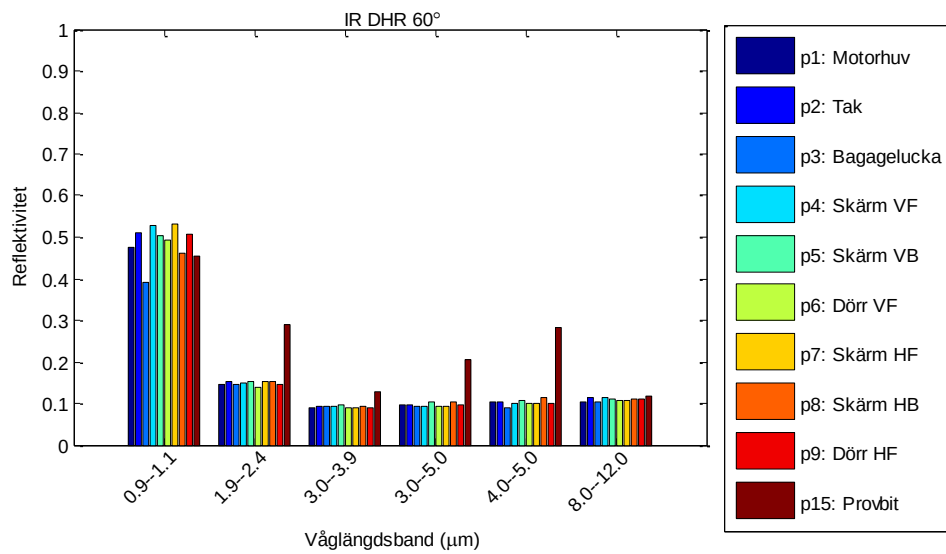
Mätpunkt	Beskrivning	Metall / Plast
1	Motorhuv	Plast
2	Tak	Metall
3	Baklucka	Plast
4	Skärm vänster, fram	Metall
5	Skärm vänster, bak	Metall
6	Dörr, vänster, fram	Metall
7	Skärm höger, fram	Metall
8	Skärm höger, bak	Metall (Tanklocket är av plast)
9	Dörr, höger, fram	Metall
14	Sidolist, svart plast	Plast
15	Lackerad plåt, provbit	Metall
16	Markisolering provbit	
17	Däck	
18	Fälg	



Figur 12. Reflektans vis—NIR, 20° infallsvinkel (handhållen utrustning).



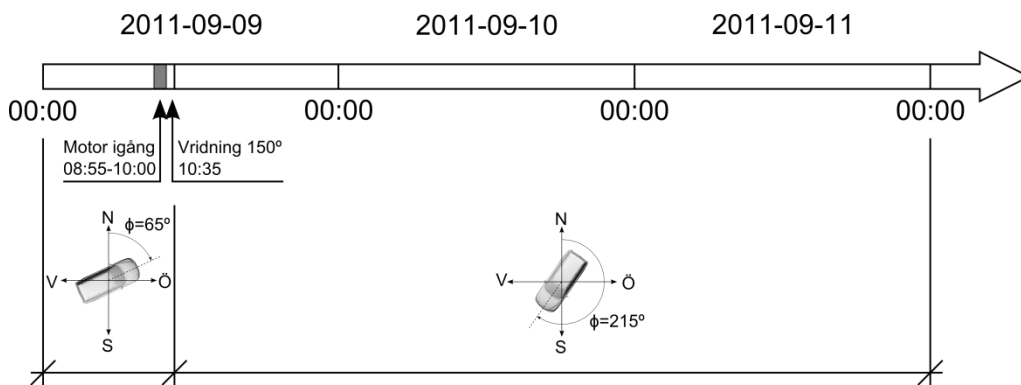
Figur 13. Reflektans IR 20° infallsvinkel (handhållen utrustning).



Figur 14. Reflektans IR 60° infallsvinkel (handhållen utrustning).

5 Resultat

Simuleringarna utfördes för tre hela dygn, 2011-09-09—11. Under dessa tre dygn var motorn igång en timma under första dygnet, och en vridning utfördes, se händelseloggen i Tabell 1. För tydlighets skull illustreras en tidslinje av simuleringdygnen i Figur 15.



Figur 15. Tidslinje för de tre dygnen som simuleras. Under första dygnet var motorn igång ca en timma (08:55—10:00), och en vridning (150°) utfördes kl 10:35.

5.1 Temperatur

I Figur 16—Figur 19 redovisas uppmätt respektive beräknad temperatur för valda punkter på fordonet, se Figur 4. Den blå kurvan i figuren är uppmätt temperatur och den röda är beräknad temperatur med RadThermIR. Det första dygnet (2011-09-09) som visas i figuren är motorn igång ca en timme mellan 08:55 och 10:00 varefter bilen roteras se Tabell 1.

I stort överensstämmer temperaturerna relativt väl för de flesta mätpunkter och tidpunkter.

Hur väl uppmätta och beräknade temperaturer stämmer överens varierar både mellan olika mätpunkter och olika tider på dygnet. I vissa fall stämmer beräkningarna inom någon grad (se till exempel Figur 16b, dagtid, som gäller temperaturen på bilens tak). I andra fall är avvikelsen 10°C eller mer (se till exempel Figur 18a, b och d, som visar temperaturen på bilens framskärmar respektive höger framdörr). Avvikelserna mellan beräknade och uppmätta temperaturer på vertikala och horisontella ytor påminner om de resultat som tidigare observerats från beräkningar på CUBI [1]. Nattetid är den beräknade temperaturen generellt för hög, något som kan ses på samtliga lackade ytor. Beräkningarna är baserade på uppmätta parametrar för provbiten. Som kan ses i Figur 13 och Figur 14 avviker provbitens reflektans i IR-området från den som är uppmätt på fordonet. Reflektansen är högre för provbiten, vilket ger en för låg emittans angiven i beräkningsprogrammet. Detta bidrar till en för hög beräknad temperatur nattetid.

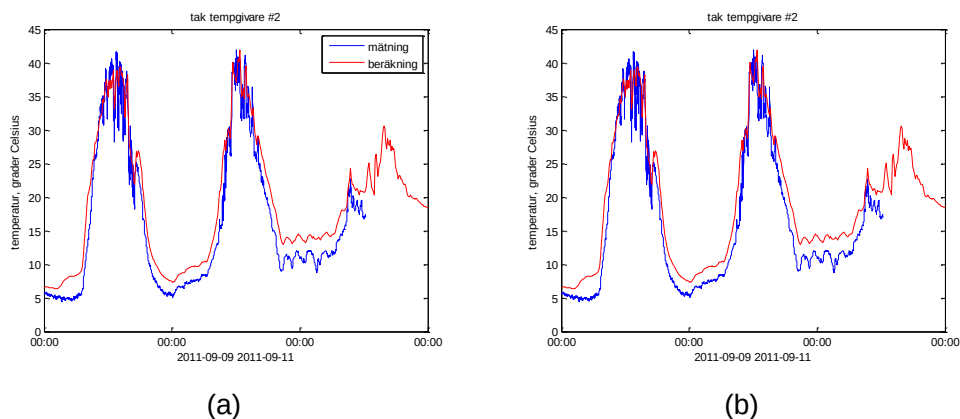
För mätpunkten på motorhuven se Figur 16a har man god överensstämmelse mellan beräknad och uppmätt temperatur det dygn då bilen varit helt avstängd (dygn nummer 2 i simuleringarna, 2011-09-10), detta gäller även för temperaturgivaren på taket (Figur 16a) som visar god överensstämmelse hela mättiden, utom nattetid. Då motorn startar (markerat med svart lodrät linje i Figur 16a) ser man att den beräknade temperaturen är för låg på motorhuven. För de båda mätpunkterna på relativt horisontella ytor gäller att överensstämmelsen är god då motorn inte är påslagen, men att beräkningarna ger en något för hög temperatur nattetid.

För bakluckan fås en god överensstämmelse det första dygnet då denna varit riktad i sydvästlig riktning. Efter vridning till nordöstlig riktning fås en för hög beräknad temperatur, se Figur 17. En förklaring till den förhöjda temperaturen är att vindrutan i beräkningarna inte reflekterar solstrålningen lika mycket som den verkliga vindrutan. Detta ses även i de beräknade radiansbilderna för tidpunkten 18:00 se Figur 23. Samma

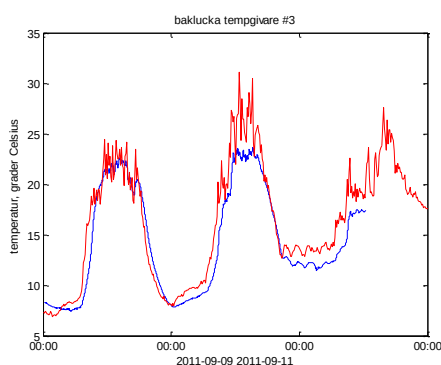
fenomen ses på vänster dörr där man får en för högt beräknad temperatur på förmiddagen då solen via vindrutan värmer insidan på dörren. Efter vridning får man samma sak på eftermiddagen. Denna förhöjda temperatur ser man inte på vänster sidas främre respektive bakre skärm som inte belyses från insidan på detta sätt. Det är god överensstämmelse för bakskrmen medan temperaturen är för lågt beräknad på framskrmen. Att det inte blir samma resultat för fram och bakskrmen kan bero på att den geometriska strukturen är annorlunda och inte helt korrekt representerad i CAD-modellen för framskrmen.

Efter att bilen vridits till $\phi=185^\circ$ får man en förhöjd temperatur under dagtid på höger sida. Detta ses tydligast på dörren och beror till stor del på att man får in för mycket solstrålning genom rutorna vilket värmer dörren från insidan. Effekten kan ses i beräknad radiansbild i Figur 20.

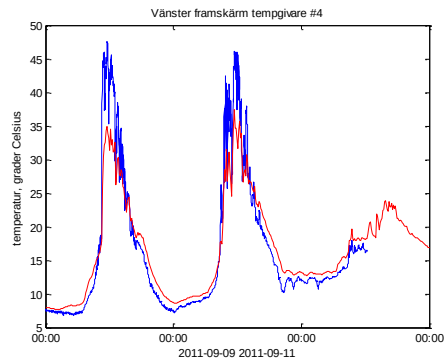
Beräknad och uppmätt temperatur på kupélufte skiljer 5—6° som mest (se Figur 19). Skillnaden beror på flera faktorer. Kupélufte (Figur 19) värms genom konvektion via ytorna inne i kupén. Då är det viktigt att det är rätt yt- och bulkegenskaper på bilens inredning. Materialen i inredningen har dock inte karakteriserats. I beräkningarna har RadThermIR standardmaterial använts. Hela inredningen är inte heller geometriskt modellerad i CAD modellen. Kupélufte är modellerad som en enskild termisk nod utan variation inne i kupén. Den beräknade temperaturen jämförs med mätningarna där temperaturgivaren hängde mitt i kupén.



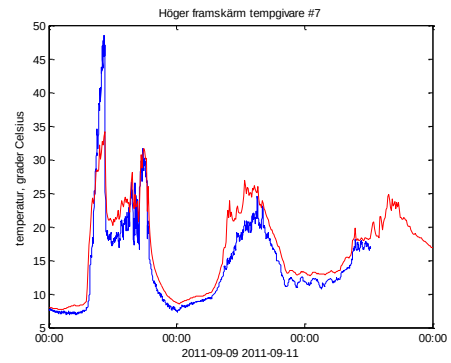
Figur 16. Temperatur för (a) motorhuv och (b) tak. Blå kurvor visar uppmätta temperaturer; röda kurvor visar beräknade temperaturer.



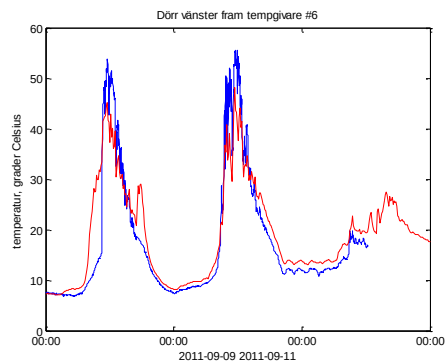
Figur 17 Temperatur för bakluckan.



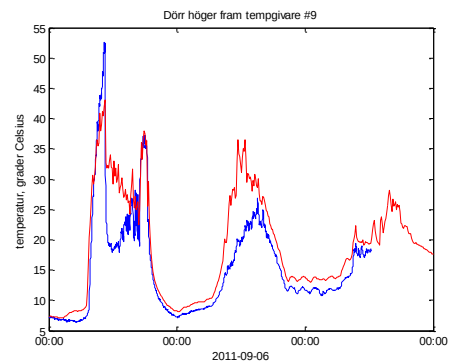
(a)



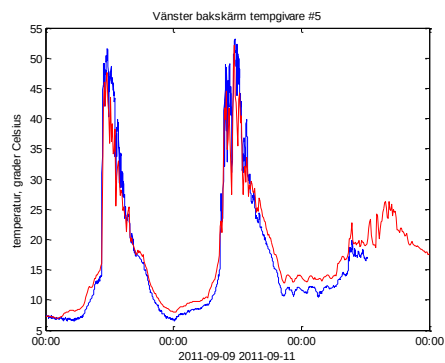
(b)



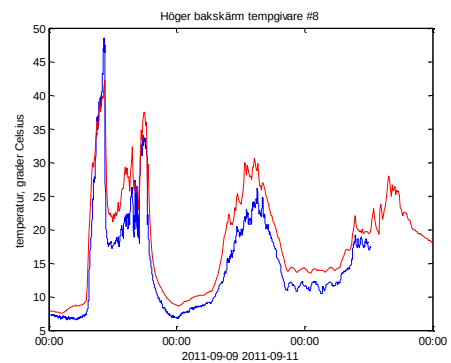
(c)



(d)

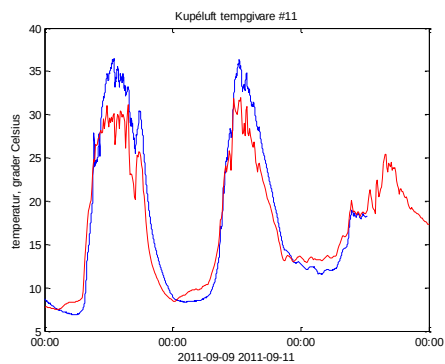


(e)



(f)

Figur 18. Temperaturkurvor för bilens sidor. Bilens vänstra sida till vänster i figuren och bilens högra sida till höger i figuren. Bilens främre skärmar överst i figuren, dörrarna i mitten och bakskärmarna längst ner.



Figur 19 Temperatur kurvor för kupélufte.



Figur 20. Radiansbild för 3,4-5 μm klockan 10:00 den 2011-09-10.

5.2 Radiansbilder

Vi har valt att presentera uppmätta och beräknade radiansbilder för tre tidpunkter, 09:00, 12:00 och 18:00 2011-09-09 (Figur 21—Figur 23). Bilderna utgörs av:

- Uppmätt skenbar temperatur.
- Beräknad skenbar temperatur där materialens ytegenskaper hanteras som helt diffusa.
- Beräknad skenbar temperatur där ytornas BRDF-egenskaper, atmosfären och vissa kameraparametrar är inkluderade.

De uppmätta radiansbilderna baseras på kamerans egen interna kalibrering. I scenen finns en svartkroppsreferens där man mäter temperaturen med Pt100-element. Temperaturen som uppmättes med kameran jämfördes med Pt100 värden. Avvikelsen var mellan 0,2° till 0,4°. Överensstämmelsen ansågs tillfredsställande varför ingen ytterligare kalibrering gjordes utöver kamerans interna kalibrering.

En stor skillnad mellan mätning och beräkning är att beräkningarna endast har en förenklad bakgrund jämfört med den verkliga scenen: plan mark med markens egenskaper, himmelsbakgrund, och en generisk, modellerad bakgrundsstrålning. I BRDF-bilderna är även atmosfären inkluderad.

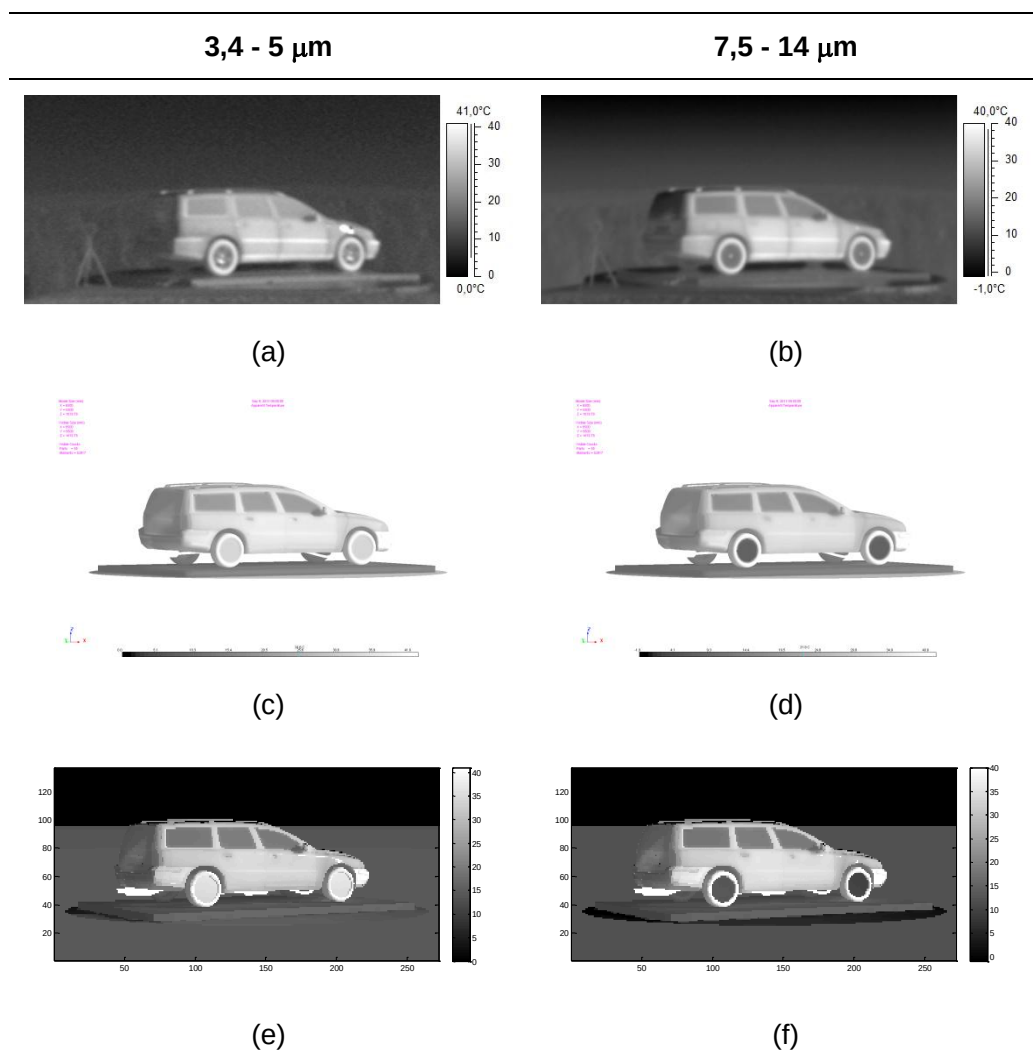
Samtliga bilder är presenterade i en gråskala med samma gränsvärden i samhörande figurer. Det är alltså samma skala för mätningar och beräkningar för respektive tidpunkt och våglängdsband. Vid jämförelse av gråskalevärden mellan uppmätt och beräknade bilder kan man generellt se en relativt god överensstämmelse. För BRDF-bilderna fås dessutom en variation i bilderna som liknar den uppmätta. I BRDF-bilderna ses även reflexer som t.ex. ses i framskärmen klockan 09:00 (Figur 21), samt skuggning på motorhuven klockan 12:00 och 18:00 (Figur 22 och Figur 23). Bilens sidolister framträder något bättre och mera likt mätningarna i BRDF-bilderna.

Klockan 09:00 är motorn på och till beräkningarna har det som indata lagts in temperaturkurvor för motorn och avgassystem. Som det kan ses i de beräknade bilderna syns avgassystemet tydligare än för de uppmätta bilderna. Detta beror förmodligen på att det antas en hög temperatur samt att avgassystemets position i CAD-geometrin skiljer

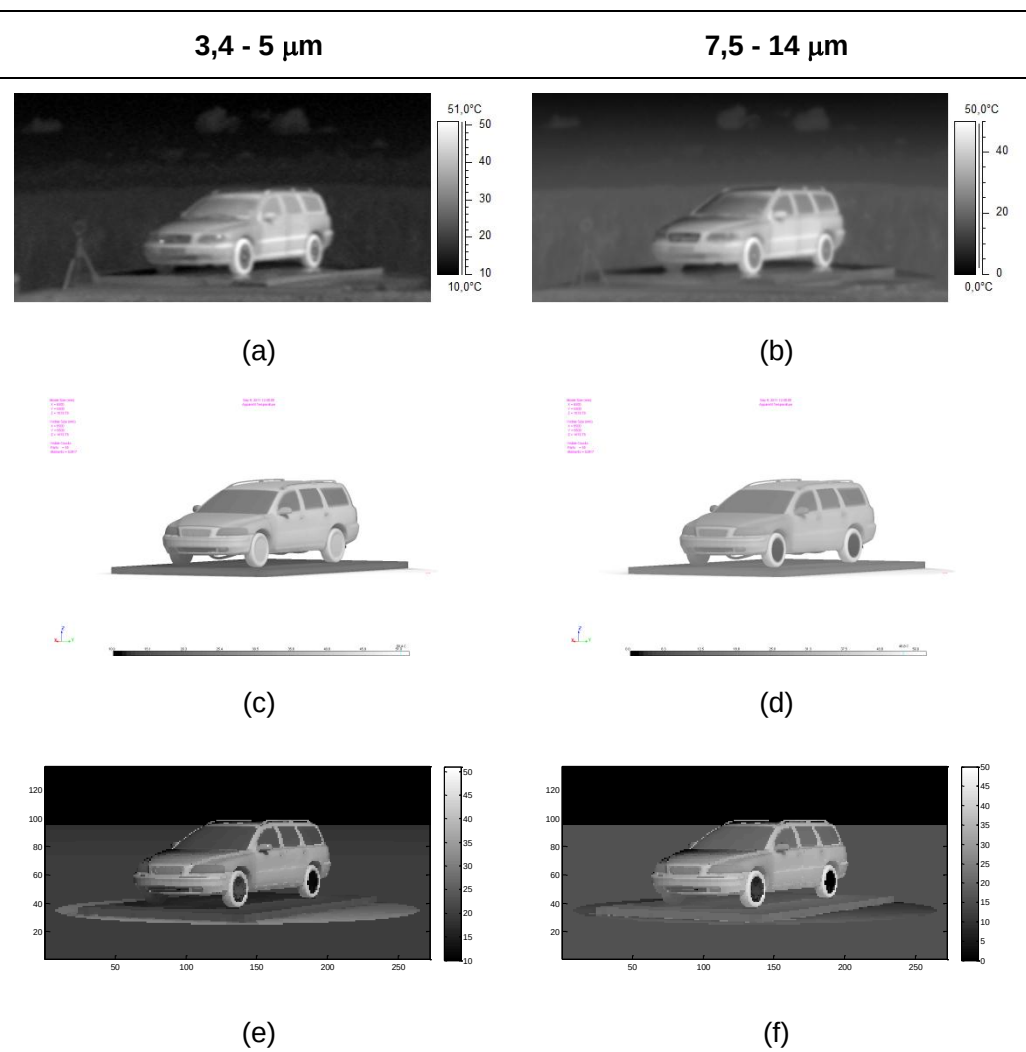
sig från verkligheten. På de uppmätta bilderna syns inte avgassystemet alls då det här döljs mera av andra delar av bilen.

Temperaturen på bilens fälgar har beräknats till en för låg temperatur och är därför för mörka i de beräknade bilderna. Detta beror främst på att materialet är felaktigt valt. Dessutom avviker CAD-geometrin från bilens verkliga fälgar.

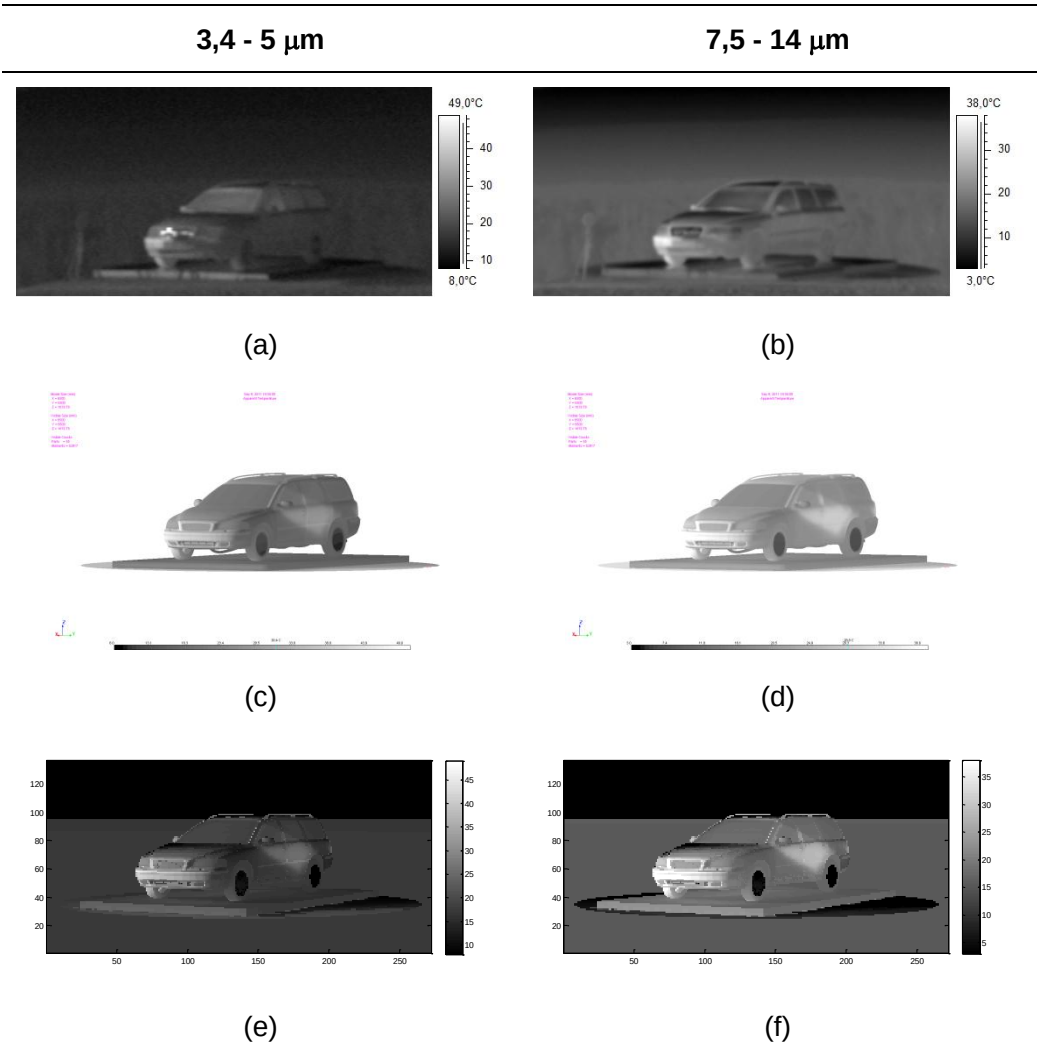
Klockan 18:00 syns i de beräknade bilderna ett ljusare område på bilens sida som helt följer solinstrålningen genom bilens rutor. Detta ses inte i kamerabilderna. Detta beror förmodligen främst på att bilens rutor inte har korrekt egenskaper i beräkningarna. Till detta kommer att det saknas viss inredning i CAD-geometrin, bl.a. framsäten, som kan ta upp en del av solinstrålningen. Det skulle även kunna bero på att bilens sidor modellerats med för dålig isolering.



Figur 21. Skenbar temperatur klockan 09:00. Bilderna i vänster kolumn [(a), (c) och (e)] är kortvågig (3,4-5 μm) och i höger kolumn [(b), (d) och (f)] långvåg (7,5- 14 μm). Översta bilderna [(a) och (b)] är uppmätt med Agema Thermovision System 900. Bilderna i mittenraden [(c) och (d)] är beräknad skenbar temperatur och bilderna i nedersta raden [(e) och (f)] är beräknad skenbar temperatur med hänsyn till BRDF och atmosfär och kameraparametrar.



Figur 22 Skenbar temperatur klockan 12:00. Se beskrivning i Figur 21.



Figur 23 Skenbar temperatur klockan 18:00. Se beskrivning i Figur 21.

6 Slutsatser

Jämförelserna mellan uppmätta och beräknade värden visar på en relativt god överensstämmelse med tanke på många antaganden och förenklingar i modellen. Detta gäller både för beräknad temperatur och radiansbilder. Beräkningarna bygger på en CAD-geometri vars olika delar försetts med materialegenskaper. CAD-modellen är en förenkling av den verkliga geometrin och är därför delvis felaktig. Resultaten visar att beräkningarna har en relativt god robusthet mot dessa avvikelser. Inför beräkningarna har man noga karakteriserat bilens lack, övriga materialegenskaper har tagits från beräkningsprogrammets standardmaterial. I stort verkar detta ge en fullgod approximation och ger acceptabla resultat. De termiska beräkningarna har alltså i detta fall en robusthet mot delvis felaktig CAD-modell och ett materialval som består av standardmaterial. Det återstår dock att utföra en objektiv jämförelse av uppmätta och beräknade radiansbilder.

Det finns avvikelser, vilka diskuteras i rapporten. Exempelvis, då solen skiner genom rutorna på insidan av bilens sidor fås en för högt beräknad temperatur. Detta beror på att bilrutornas egenskaper är felaktigt satta i beräkningarna. En plåtbit målad med ”bättringsfärg” i bilens kulör har använts vid karakteriseringen av lackens egenskaper. Det är dessa parametrar som använts vid beräkningarna. Plåtbiten och den verkliga bilen mättes med handhållen utrustning som ger DHR-värden. För våglängdsområdet 1,9-5 μm avviker plåtbitens DHR-värden från bilens värden. Detta antas bidra till att man genomgående får en för högt beräknad temperatur nattetid. I det visuella området får man en god överensstämmelse. Då provbitens egenskaper avviker från lackens egenskaper på bilen är det bättre att karakterisera det verkliga materialet med enklare metoder än en mycket noggrann uppmätning av material vars egenskaper riskerar att avvika från egenskaperna hos det verkliga materialet.

Vi konstaterar att man kan utgå från en relativt grov modell, både avseende geometri och materialegenskaper, för att göra inledande beräkningar och få fram preliminära resultat. Efter analys av resultat kan valda parametrar förfinas.

Förslag till fortsatt arbete är att utföra nya beräkningar med mer noggrant satta parametervärden och andra objekt. Redovisad metod är direkt applicerbar på militära fordon. Andra plattformar kan hanteras men kan kräva tillägg för bakgrunder och plymer som inte hanteras i detta arbete utan utgör del av fortsatt arbete.

Som fortsatt arbete är speciellt följande punkter prioriterade:

- Att ta fram mer korrekta materialegenskaper till RadThermIR. Detta gäller både lackens egenskaper och de olika materialens termiska egenskaper.
- Att ta fram bättre beskrivning av fordonets geometriska struktur i ”djupled”, det vill säga vilka olika materiallager som finns inuti dörrar, tak, motorhuv etcetera.
- Att ta fram en metod för, och utföra, en objektiv analys jämförelse av uppmätta och beräknade radiansbilder.
- Att studera fler realistiska objekt som militära fordon, helikopter eller fartyg med avseende på termiska egenskaper och signaturegenskaper.
- Att utveckla tekniken för att modellera realistiska bakgrunder, även bakgrunder med komplicerade geometrier som skog, kuperad mark med växtlighet, eller vattenytor i olika sjöstillstånd.

7 Referenser

- [1] Jan Fagerström, Tomas Hallberg, Annica Hjelm, Nils Karlsson, Roland Lindell och Andreas Persson, "IR-analys av ett generiskt markobjekt CUBI", FOI rapport FOI-R--2888--SE, Linköping (2009).
- [2] Jan Fagerström, Annica Hjelm, Nils Karlsson, Roland Lindell och Jonas Rahm, "Termiska beräkningar på två varianter av referensobjekt CUBI", FOI rapport FOI-R--3268--SE, Linköping (2011).
- [3] Claes Nelsson, Pär Nilsson, "Measurement Equipment at the department of IR-Systems, Division of Sensor Technology", FOA-R—99-01111-615—SE, 1999.
- [4] George J. Zissis, *editor* "Source of Radiation", SPIE PRESS, 1993.
- [5] <http://www.vaisala.com>
- [6] "RadThermIR Version 10.1 User Manual", Manual for RadThermIR, revision 20110419, ThermoAnalytics, Inc., (2011). Web-sida: <http://www.thermoanalytics.com>.
- [7] ASTM Standard G173-03, 2003, "Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface" ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, DOI: 10.1520/G0173-03R08, www.astm.org.
- [8] Brian P. Sandford and David C. Robertson, "Infrared Reflectance Properties of Aircraft Paints", Proceedings of IRIS Targets, Backgrounds and Discrimination, pp 111-127, (1985).
- [9] Surface Optics 410-Solar Visible/NIR Hand-Held Reflectometer, <http://www.surfaceoptics.com>.
- [10] Surface Optics SOC 410 Hand-Held DHR Reflectometer, <http://www.surfaceoptics.com>.