# Hinweise zum Stadtklima von Stuttgart aus Infrarot-Wärmebildern

*Ulrich Hoffmann*

## Einleitung

Das Bundesbaugesetz in der Fassung vom 18. August 1976 schreibt in § 1 Abs. 6 vor, daß bei der Aufstellung von Bauleitplänen (Flächennutzungsplan, Bebauungsplan) *die Belange des Umweltschutzes* sowie *die Erhaltung und Sicherung der natürlichen Lebensgrundlagen, insbesondere des Bodens, des Wassers, des Klimas und der Luft* besonders zu berücksichtigen seien. Damit sind die Begriffe «Klima» und «Luft» in den Rang wichtiger Planungsfaktoren erhoben.
Vor allem im urbanen Bereich sowie in den industriellen Ballungszentren und Verdichtungsräumen ist die Berücksichtigung lufthygienischer Gesichtspunkte und klimatischer Gegebenheiten bei allen raumbedeutsamen Planungen, speziell in der Stadtplanung, besonders dringlich. Doch gibt es gerade auf dem Gebiet der Stadtplanung sehr viel konkurrierende Planungsziele, die im Gegensatz zu den Gesichtspunkten «Luft» und «Klima» in ihrem wirtschaftlichen, sozialen oder technischen Nutzen konkret zu berechnen sind. In strittigen Planungsfragen besteht für die klimatisch-lufthygienischen Belange gegenüber den anderen Planungszielen nur

Abb. 1: Die Stuttgarter Innenstadt ist auf Frischluftschneisen angewiesen

dann eine Chance der Durchsetzbarkeit, wenn in der Öffentlichkeit und bei den Entscheidungsträgern das notwendige Verständnis für das Gewicht meteorologischer Argumente auf der anderen Waagschale vorhanden ist. Um die notwendige sorgfältige Abwägung und Wichtung der sich widersprechenden Planungsbedürfnisse durch politische Entscheidungsgremien zu ermöglichen, bedarf es meteorologischer Untersuchungen zum Stadtklima, aus denen sich als Entscheidungshilfen auch für Laien einleuchtende Schlußfolgerungen ziehen lassen.

Deshalb werden in verschiedenen Städten schon seit mehreren Jahren stadtklimatische Messungen vorgenommen mit einer – meist beratenden– Beteiligung von Meteorologen in der Stadtplanung. Die Begriffe «Stadtklima» und «Stadtklimatologie» haben sich in Anlehnung an das im Jahre 1937 im Kloster Ettal von P. A. Kratzer verfaßte Buch mit dem Titel «Das Stadtklima» allmählich für ein verhältnismäßig neues Arbeitsgebiet der Meteorologie und der Bauphysik eingebürgert. Man versteht heute darunter die Anwendung meteorologischer Gesetzmäßigkeiten auf die bodennahe, mit Bauten durchsetzte Luftschicht der Stadtlandschaft, die gegenüber der natürlichen Landschaft eine extrem andersartige Oberflächenbeschaffenheit aufweist.

In Stuttgart existiert mit der Klimatologischen Abteilung des Chemischen Untersuchungsamtes der Stadtverwaltung die zur Zeit einzige kommunale Dienststelle der Bundesrepublik, die mit dem Auftrag, stadtklimatische Eigentümlichkeiten Stuttgarts zu studieren und Konsequenzen für die Stadtentwicklung aufzuzeigen, seit 1952 voll in den kommunalen Planungsprozeß integriert ist. Die Beteiligung erfolgt in Form von Gutachten und Stellungnahmen mit Bedenken und Anregungen zu Planungsvorhaben, die im Anhörungsverfahren der «Träger öffentlicher Belange» im Auftrag des städtischen Gesundheitsamtes abgegeben werden. Insofern entspricht die in Stuttgart gepflegte Praxis schon lange den Forderungen des eingangs erwähnten Bundesbaugesetzes.

Das Kardinalproblem für eine Berücksichtigung des Klimas in der städtebaulichen Planung besteht darin, daß viele planungsbezogene Fragestellungen einerseits und das allgemein verfügbare meteorologische Datenmaterial andererseits unterschiedlichen meteorologischen Maßstabsgrößen («Scales») angehören:

Bei den gewöhnlich vorhandenen und allgemein zugänglichen meteorologischen Daten handelt es sich meistens um Klimamittelwerte. Diese Informationen entstammen überwiegend den langjährig betriebenen Meßstationen des weltweiten Wetter- und Klimabeobachtungsnetzes. Der Aufgabe dieses «Makroscale»-Meßnetzes entsprechend, sind die Beobachtungsorte gerade so gewählt, daß sie nicht dem kleinräumigen Einfluß ihrer unmittelbaren Umgebung unterliegen, sondern ein größeres Gebiet repräsentieren. Trotz der in Westeuropa recht engen Maschenweite des meteorologischen Meßnetzes ist es doch zu großräumig, um Aufschluß geben zu können über die Struktur meteorologischer Parameter innerhalb einer Stadtregion.

Fragen des Stadtklimas mit den meteorologischen Besonderheiten einer durch Bauwerke geprägten Erdoberfläche gehören im Falle ausgedehnter Stadtlandschaften dem «Mesoscale» an. Beim Übergang zum einzelnen Stadtteil, mit dem Geltungsbereich eines Bebauungsplanes oder bei der Begutachtung einer Standortfrage befindet man sich größenordnungsmäßig im Bereich des meteorologischen «Mikroscale», dessen typische Maßstabslängen unterhalb 1000 m liegen.

Ein jedes Mikroklima ist in das jeweilige Großraumklima eingebettet. Die Eigenschaften des Makroklimas geben dabei Auskunft über die Frage, in welchem Umfang bei besonderer Berücksichtigung der landschaftlichen Gegebenheiten wie Relief, Vegetation und Bebauung an einem Ort mit der Ausbildung eines eigenständigen Mikroklimas zu rechnen ist und welche örtlichen Klimatatsachen dadurch entstehen.

Im städtebaulichen Zusammenhang interessieren kleinräumige Klimamerkmale im Hinblick auf ihre planungsrelevanten Auswirkungen, was prinzipiell die Bereiche des Wuchsklimas, des Behaglichkeitsklimas, der Technoklimatologie, insbesondere aber den Bereich des Immissionsklimas berührt.

Das Immissionsklima beschreibt jene meteorologischen Eigenschaften der bodennahen Erdatmosphäre, die zur Anreicherung oder zum Abtransport bzw. zur Verdünnung von Luftschadstoffen im Lebensraum der Menschen führen, d. h. die das Ausmaß der Schadstoff-Immission wesentlich mitbestimmen.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen großräumiger und kleinräumiger Betrachtungsweise der Meteorologie besteht darin, daß gerade die mikroskalige Erkundung des Klimas kleinster Gebiete eine sichere räumliche Erfassung meteorologischer Parameter erfordert.

Dies ist der Grund für die Einrichtung engmaschiger meteorologischer Sondermeßnetze, deren temporäre Meßstellen mindestens für ein Jahr unterhalten werden. Zur Ergänzung dienen meteorologische Experimente und Untersuchungen, die während

Abb. 2: Der Stuttgarter Osten bei einer Smog-Wetterlage

des kurzen Zeitraumes einer ausgewählten Wetterlage Informationen mit hoher räumlicher oder flächenhafter Auflösung vermitteln.
Die Stadt Stuttgart hatte deshalb im Jahr 1976 Meßflüge mit Infrarot-Scanner in Auftrag gegeben, um bei einer speziellen Wetterlage Kartierungen der nächtlichen Temperaturentwicklung im Stadtgebiet zu erhalten. Das farbige Bildmaterial sowie die Interpretation der Verteilung von Oberflächentemperaturen im Stadtgebiet sind als Broschüre in der Reihe «Beiträge zur Stadtentwicklung» von der Landeshauptstadt Stuttgart veröffentlicht worden. Der vorliegende Aufsatz berichtet aus dieser Abhandlung. Es werden dort mit der Präsentation des Stadtgebietes im infraroten Wärmebild die Reliefverhältnisse der Landschaft sowie die unterschiedlichen Formen der Vegetation und Bebauung veranschaulicht und deren Zusammenwirken bei der Ausbildung thermisch-induzierter lokal begrenzter Luftströmungen nach Stadtteilen gegliedert diskutiert.
Der vorliegende Aufsatz beschränkt sich darauf, einige typische Ergebnisse dieser Untersuchung wiederzugeben und die Anwendungsmöglichkeiten infrarot-thermographischer Meßflüge zu erläutern.

## Grundlagen der Infrarot-Thermographie

Grundlage der Infrarot-Thermographie ist die Messung der infraroten Wärmestrahlung im Wellenlängenbereich von 8–13 $\mu$m, die von jedem Körper nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz der Ausstrahlung an die Umgebung abgegeben wird. Mit dieser Strahlungsmessung erhält man auch über große Distanzen die Temperatur der jeweils untersuchten Bodenoberflächen, wenn die Messung beispielsweise vom Flugzeug oder Satelliten aus erfolgt («remote sensing of environment»). Für die Thermographie-Meßflüge benutzt man den genannten Wellenlängenbereich von 8–13 $\mu$m vor allem deshalb, weil für diese Wellenlängen der emittierten Wärmestrahlung die Erdatmosphäre praktisch transparent ist. In diesem Bereich des Spektrums sind die Beträge der Strahlungsabsorption der Erdatmosphäre mit ihren Beimengungen von Kohlenmonoxid und Wasserdampf minimal. Der hohe Durchlässigkeitsgrad der Atmosphäre für diesen Wellenlängenbereich führt deshalb auch zum Begriff des «Infrarot-Fensters».
Bei der Infrarot-Thermographie entsteht zunächst kein optisches Bild des Aufnahmegegenstandes. Das räumliche Nebeneinander der Bildpunkte wird

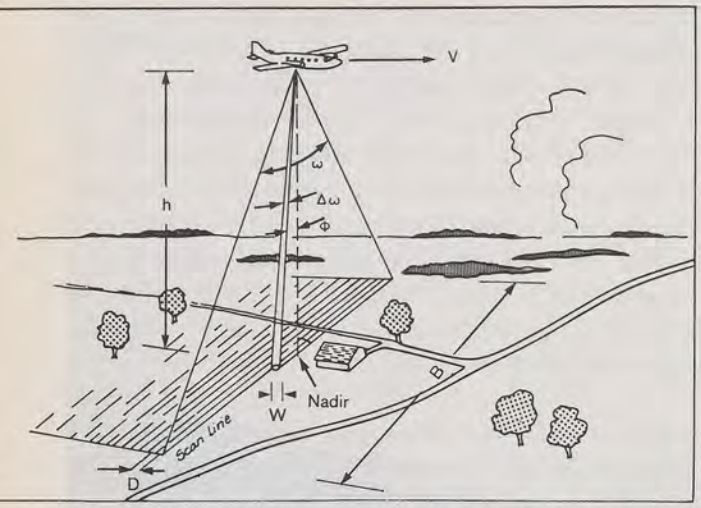



Abb. 3: Schematische Darstellung der «streifenweisen» Aufnahme mittels eines sog. Scanners

mittels eines sog. Scanners in ein zeitliches Nacheinander elektrischer Meßsignale der emittierten infraroten Wärmestrahlung umgewandelt. Zur Aufzeichnung der Meßdaten dient ein Magnetband. Um ein ganzes Wärmebild des zu untersuchenden Gebietes zu erhalten, bedarf es vieler einzelner Infrarot-Messungen, die nach dem Zeilenabtastverfahren (ähnlich einer Fernsehaufnahme) kurz hintereinander streifenweise senkrecht zur Flugrichtung von dem rotierenden Spiegelsystem des Scanners und einem empfindlichen, schnell ansprechenden Halbleiter-Detektor dieses speziellen Meßgerätes vorgenommen werden. (Vgl. Abbildung 3)
Die Infrarot-Thermographie zur Messung von Oberflächentemperaturen darf nicht mit der Infrarot-Photographie verwechselt werden, bei der es sich um photographische Aufnahmen mit einem im «nahen» Infrarot des Spektrums empfindlichen Farbfilmmaterial handelt. Photographische Infrarotaufnahmen umfassen dabei den Wellenlängenbereich von 0,8–1,1 $\mu$m. Das sog. photographische Infrarot gehört zu dem großen Wellenlängenbereich, in dem die Strahlen des direkten Sonnenlichtes und des indirekten Himmelslichtes reflektiert werden. Je nach Pflanzenart und Chlorophyllgehalt ergeben sich unterschiedliche Beträge der Strahlenabsorption bzw. Reflexion, was man für die als Falschfarbenphotographie bezeichnete Methode ausnutzt. So liefert die Infrarot-Photographie Informationen über Bodennutzung, Vegetationsformen, Schädlingsbefall und Wachstumsstörungen von Pflanzenbeständen.

Bei der Verwendung eines sog. Multispektral-Scanners im Meßflugzeug umfaßt die Information elf verschiedene Spektralbereiche, die sich vom «nahen» Ultraviolett über das sichtbare Licht (Luftbild) und das photographische Infrarot schließlich bis zum thermalen Infrarot erstrecken. Auf diese Weise ist es möglich, durch die Auswertung einzelner Kanäle der auf Band registrierten Meßdaten ganz unterschiedliche Informationen über die Erdoberfläche zu gewinnen. Es sollen im folgenden jedoch nur Messungen im Bereich des thermalen Infrarot behandelt werden.
Aufgrund der bekannten Beziehung zwischen der Temperatur und Ausstrahlung eines physikalisch Schwarzen Körpers nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz und unter Verwendung eines in den Scanner eingebauten Vergleichs-Strahlers lassen sich die Meßsignale der infraroten Wärmestrahlung in Schwarzkörper-Temperaturen umrechnen, die man näherungsweise mit den Oberflächentemperaturen des Meßgebietes gleichsetzen kann. Mit Hilfe einer Datenverarbeitungsanlage entsteht die Montage eines weitgehend kartographisch entzerrten «Wärmebildes», welches durch die Flächen gleicher Farbe oder Grautönung Oberflächen mit gleicher Temperatur wiedergibt. Es handelt sich dabei um eine großflächig (z. B. in einem Stadtgebiet) und doch beinahe gleichzeitig vorgenommene Temperaturkartierung, wie sie mit einer vergleichbaren flächenhaften Informationsdichte durch kein Meßnetz zu erreichen wäre: Bei einer Flughöhe des Meßflugzeuges von 3500 m werden noch die Temperaturen von Flächen bzw. Gegenständen mit nur 10 m Ausdehnung aufgelöst.
Eine Alternative bieten Temperaturmeßfahrten mit dem Kraftfahrzeug nach herkömmlicher Art. Doch führt hier der beträchtliche Arbeitsaufwand nicht immer zum gewünschten Erfolg: Die Meßpunkte können bei einer Meßfahrt nur mit zeitlicher Verzögerung nacheinander angelaufen werden. Auch ergeben sich durch die Benutzung eines Kraftwagens und seine Bindung an Straßen weitere Fehlermöglichkeiten. Aber auch die mit dem Meßflugzeug vorgenommene Infrarot-Thermographie stellt für sich allein keine in jeder Hinsicht vollkommene Patentlösung für klimatologische Untersuchungen dar. So ist der schon oft gehörte Begriff eines «Klima-Meßfluges» fehl am Platz: Unter dem Klima versteht man in seinem klassischen Sinne *die Gesamtheit aller an einem Ort möglichen und im Verlauf eines langjährigen Zeitraumes auch tatsächlich auftretenden Wetterzustände einschließlich ihrer typischen Aufeinanderfolge sowie der tages- und jahreszeitlichen Schwankungen.*
Bei infrarot-thermographischen Untersuchungen behandelt man indessen einen ausgewählten meteorologischen Einzelfall, wobei sich diese Untersuchung auf das Phänomen unterschiedlicher Oberflächentemperaturen beschränkt. Die Messung die-

Abb. 4: Nebelfelder markieren stagnierende Kaltluftschichten auf den Fildern

ser Temperaturen erfolgt zudem unter der nicht für alle natürlichen und künstlichen Oberflächen gleichermaßen gültigen Annahme, daß deren Emissionsvermögen mit dem eines Schwarzen Strahlers nahezu identisch ist.

Die vom Meßflugzeug aus gewonnenen Augenblicksbilder der Oberflächentemperatur-Verteilung in einer Stadt können keine fertigen Aussagen zur Stadtklimatologie als vielschichtigem Problem präsentieren, denn das Klima eines Ortes kann man nicht *aus der Luft ermitteln* (Schlagzeile eines Zeitungsartikels), indem man ein Flugzeug für zwei Stunden am Himmel kreisen läßt.

Durch die Infrarot-Thermographie ist aber die Möglichkeit gegeben, während eines geeigneten Tages mehrere Momentaufnahmen der Temperaturverteilung zu gewinnen und die tageszeitlich bzw. witterungsbedingte Veränderung von Temperaturstrukturen in einem Stadtgebiet zu verfolgen.

Das Ziel der Auswertung ist dabei, mit den Gesetzmäßigkeiten der Geländeklimatologie Hinweise auf lokale Luftaustauschprozesse zu erhalten bzw. auf Gebiete der Stadtlandschaft, die für die Ausbildung lokaler Windsysteme eine wichtige Funktion haben. Demnach handelt es sich um die meteorologischen Wechselwirkungen zwischen der dicht bebauten Kernstadt und ihrer Umgebung.

Solche Schlußfolgerungen erfordern jedoch eine realistische Vorstellung vom Zusammenwirken der meteorologischen Parameter in der bodennahen Luftschicht. Auch lassen sich Infrarot-Meßflüge nur bei Kenntnis der örtlichen Geländeverhältnisse und im Zusammenhang mit anderen meteorologischen Messungen, sozusagen als Bestandteil einer «Indizienkette», sinnvoll auswerten.

Windarmut und ausgeprägtes Geländerelief des Untersuchungsgebietes sind eine wichtige Voraussetzung für die erfolgversprechende Anwendung der Infrarot-Thermographie; denn nur unter diesen Bedingungen ist mit der Entwicklung planungsrelevanter lokaler Windsysteme zu rechnen.

Mit zunehmender Windgeschwindigkeit, die von der geographischen Lage eines Ortes und vom Großwetter bestimmt wird, verwischen die rein lokalen, geländeklimatischen Vorgänge, bis sie schließlich ganz vom großräumigen Wettergeschehen überlagert werden.

In Stuttgart treten bei einem Jahresmittelwert der Windgeschwindigkeit von nur 2 m/s austauscharme Wetterlagen mit behinderter Luftzirkulation sehr häufig auf. So ist aufgrund einer Schwachwindstatistik des Deutschen Wetterdienstes der Flughafen Stuttgart der windschwächste der Bundesrepublik: Die Häufigkeit sog. Schwachwindsituationen liegt hier mit 42 % dreimal so hoch wie beispielsweise in Berlin. Die im Mittel nur schwache Winddurchlüf-

tung Stuttgarts bedeutet wegen der damit verbundenen Smoganfälligkeit einen schwerwiegenden lufthygienischen Risikofaktor.
Deshalb stellt sich für den Raum Stuttgart die Frage des lokalen Luftaustausches durch thermisch induzierte Windsysteme mit größerer Dringlichkeit als etwa in den Städten des norddeutschen Flachlandes. Zudem ist hier die Infrarot-Thermographie eine geeignete Untersuchungsmethode, da bei der häufig geringen Ventilation des Stadtgebietes auf räumlich engem Gebiet starke Temperaturunterschiede auftreten.
Die sich daraus entwickelnden lokalen Luftaustauschprozesse, speziell der nächtliche Kaltluftabfluß, werden durch die Reliefverhältnisse in Stuttgart wesentlich unterstützt. So bestehen im Stuttgarter Stadtgebiet Höhenunterschiede von mehr als 300 m. Allein im inneren Stadtbereich gibt es Höhenunterschiede von 200 m. Vor allem die südöstliche Umrandung des Innenstadtkessels weist schluchtartige Geländeeinschnitte, sog. Klingen auf, die als Frischluftschneisen für die Innenstadt wirken.
Das Bild 7 soll dazu die Reliefverhältnisse des Stuttgarter Südens und den Verlauf des von Südwesten in die Innenstadt einmündenden und sie durchquerenden Nesenbachtales veranschaulichen. Es handelt sich um die Fotografie eines Schichtenmodells, das Höhenstufen von 10 m wiedergibt. Nordöstlich des «Birkenkopfes» ist auch die Lage eines von drei Seiten von Randhöhen umgebenen Stadtteils im sog. Westkessel (15) ersichtlich. Die in das Nesenbachtal einmündende «Heidenklinge» ist im Infrarot-Bild mit (11) bezeichnet.

## Stuttgart im infraroten Wärmebild

Im Juni 1976 wurden zwei Infrarot-Meßflüge über dem Stuttgarter Stadtgebiet vorgenommen, aus deren Magnetbandaufzeichnungen zwei unmittelbar vergleichbare «Wärmebilder» in der Form sog. Farb-Äquidensiten entstanden sind.
Es handelt sich dabei um Temperaturkartierungen vom Abend des 8. Juni 1976 bei Sonnenuntergang und vom frühen Morgen des nächsten Tages, aufgenommen eine Stunde vor Sonnenaufgang. Die Meßergebnisse dieser zweiten Überfliegung sind in den Abbildungen 5 und 6 als Schwarzweißabzüge

Abb. 5/6: Hier handelt es sich nicht etwa um fotografische Aufnahmen, sondern um die Sichtbarmachung von zunächst elektronisch aufgezeichneten Wärme-Meßwerten, die im Stadtgebiet von Stuttgart zwischen den Städten Sindelfingen im Westen (14) und Waiblingen im Osten (7) erhoben worden sind. Die Schwarzweiß-Wiedergabe der ursprünglich farbigen «Karte» muß unzulänglich bleiben, zumindest bedarf sie der umfangreichen Interpretation, die auf den folgenden Seiten gegeben wird. Die Ziffern dienen der Orientierung (vgl. die Erläuterungen im Text auf Seite 129).

wiedergegeben. Dabei zeigt Abbildung 5 das südwestliche Stadtgebiet von Stuttgart, während der östliche Teil in Abbildung 6 dargestellt ist.
Insgesamt wird mit diesen beiden Bildausschnitten der morgendlichen Temperaturkartierung das Gebiet zwischen den Städten Sindelfingen (im Westen) und Waiblingen (im Osten) abgebildet.

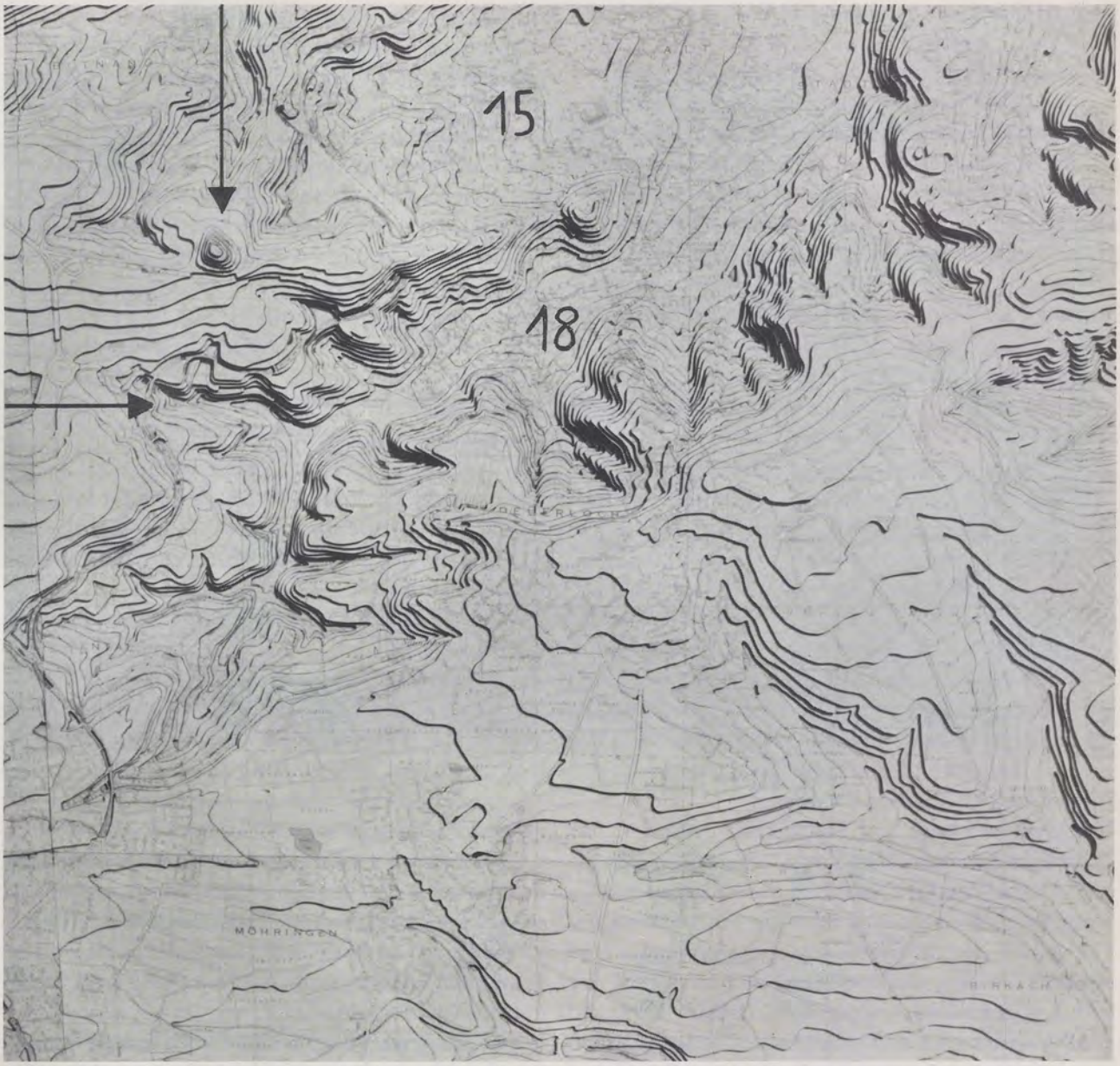



Abb. 7: Reliefkarte des Stuttgarter Südens. Der senkrechte Pfeil weist auf den Birkenkopf, der waagrechte auf die in das Nesenbachtal einmündende Heidenklinge.

Als Orientierungshilfen sind in den Wärmebildern mit Ziffern versehen:
Im Bild 6
- das Band des Neckars zwischen dem Max-Eyth-See (1) und dem Stuttgarter Hafen (2),
- der Stuttgarter Hauptbahnhof in der City (3),
- der Killesberg (4),
- der Schurwald (5),
- die Städte Fellbach (6) und Waiblingen (7);

Im Bild 5
- das Nesenbachtal (8)
  (vgl. dazu auch die Reliefaufnahme Abb. 7)
- das Feuerbacher Tal (9),
- eine Seenkette im Erholungsgebiet Rot- und Schwarzwildpark (10),
- die Heidenklinge (11),
- die Stuttgarter Stadtteile Vaihingen (12) und Degerloch (13),
- die Stadt Sindelfingen (14).

Für die Messungen war ein wolkenloser Tag bei Hochdruckwetter ausgewählt worden. Durch Wolken würde die vom Flugzeug aus vorgenommene Strahlungsmessung verfälscht. Auch interessierte hier der Verlauf der nächtlichen Abkühlung durch Wärmeausstrahlung des Erdbodens, was nur in klaren Nächten möglich ist. Außerdem mußte am Meßtag nahezu Windstille herrschen, damit sich Temperaturunterschiede deutlich ausbilden konnten. Somit waren die meteorologischen Verhältnisse an diesem Junitag bei voll entwickelter Vegetation allein durch die starke Sonneneinstrahlung zur Tag-

zeit und durch die Wärmeabstrahlung zur Nachtzeit bestimmt.
Die beiden Wärmebilder vom frühen Morgen des 9. Juni 1976 zeigen mit den Flächen gleicher Grautönung die Bereiche gleicher Oberflächentemperaturen. Die auf diese Weise dargestellte Temperaturverteilung umfaßt hier den Bereich von 17,0 °C (weiße Flächen) bis 8,0 °C (schwarze Flächen). Die zwischen schwarz und weiß liegenden vier Grauabstufungen entsprechen jeweils einem Temperaturintervall von 1,5 °C. Schwarz markiert auch Temperaturen unterhalb 8,0 °C, wenn der eingestellte Meßbereich unterschritten wurde. Die Temperaturmessung ist auf einen geräteinternen, temperaturkontrollierten Vergleichsstrahler bezogen.
Das Stuttgarter Stadtgebiet präsentiert sich hier in der Endphase der nächtlichen Abkühlung, die nur durch das thermische Eigenverhalten der Stadtlandschaft beeinflußt wurde.
Zum morgendlichen Meßtermin beträgt die Temperaturdifferenz zwischen den Oberflächen dichter städtischer Bebauung und den ebenen, unbewaldeten und vorwiegend landwirtschaftlich genutzten Freilandflächen, insbesondere in der nordöstlichen und südwestlichen Umgebung Stuttgarts, 9 °C und mehr. Man spricht deshalb auch von einem Wärmeinsel-Effekt städtischer Bebauung.
Eine Ansammlung von Bauwerken verändert das örtliche Klima stets in Richtung höherer Temperaturen. Dieses Merkmal städtischer Siedlungsformen ist auf verschiedene Ursachen zurückzuführen:
So werden die Oberflächentemperaturen ganz wesentlich vom sog. Bodenwärmestrom bestimmt, der von den physikalischen Größen Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität abhängig ist. In der urbanen Landschaft überwiegen mit den ausgedehnten Stein-, Beton- und Asphaltflächen Materialien mit höheren Werten, vor allem der Wärmeleitfähigkeit. Dadurch wird die «Einlagerung» der als Sonnenstrahlung am Tage empfangenen Wärmeenergie in die verschiedenen die Erdoberfläche bildenden Materialien begünstigt. In Stadtgebieten stellt man deshalb zur Nachtzeit einen erhöhten Energierückfluß fest mit Wärmeabgabe aus den Oberflächen. Die in größeren Siedlungen erhöhten Temperaturen sind außerdem eine Folge der verminderten Verdunstung, weil durch die befestigten Flächen der Abfluß des Niederschlagswassers gesteigert wird.
In der unbebauten Landschaft dagegen bewirkt die Wasserverdunstung erhebliche Abkühlungsbeträge: So werden an einem heiteren Sommertag größenordnungsmäßig zwischen 33% (kurzer Rasen) und 60% (Buchenwald) der von der Sonne eingestrahlten Wärme für die Verdunstung verbraucht. Im Laufe einer Vegetationsperiode wird dem Buchenwald je Quadratmeter Bodenfläche durch Wasserverdunstung diejenige Wärmemenge entzogen, die vergleichsweise bei der Verbrennung von 24 Litern Leichtöl frei würde.
Die Hauptursache des urbanen Wärmeinsel-Effektes ist aber darin zu sehen, daß die Vielzahl senkrechter Oberflächen der städtischen Bebauung eine vergleichsweise stärkere Umsetzung der kurzwelligen Sonneneinstrahlung in Wärme verursacht. Auch ist die Wärmeausstrahlung innerhalb dicht bebauter Stadtquartiere aufgrund vielfältiger Reflexionen und Absorption an den Hauswänden im Vergleich zur freien Landschaft stark behindert. Somit wirken Straßenschluchten als «Strahlungsfallen», was bei thermisch belastenden Wetterlagen ganz wesentlich zum Schwüle-Empfinden beiträgt, da die Entwärmung des menschlichen Körpers genau wie die der Hausfassaden behindert wird (sog. Backofen-Effekt).
Ein weiterer Grund für den in Großstädten um durchschnittlich 2 °C höheren Jahresmittelwert der Lufttemperatur ist die durch Verbrennungsprozesse in Industrie, Haushalt und beim Verkehr künstlich zugeführte Wärmeenergie. Im infraroten Wärmebild lassen sich viele Quellen dieser anthropogenen Wärmezufuhr direkt lokalisieren: Baulichkeiten mit größeren Feuerungsanlagen, Gebäude mit unzureichender Wärmeisolierung, Kesselhäuser, Schmelzanlagen und Gießereien fallen durch vergleichsweise hohe Oberflächentemperaturen auf. Ein Beispiel für die Kühlwasser-Einleitung eines Kraftwerkes in den Neckar findet man im Stuttgarter Stadtgebiet Gaisburg (16).
Ein Vergleich der Wärmebilder vom frühen Morgen mit der hier nicht abgebildeten Temperaturverteilung zum abendlichen Meßtermin des Vortages zeigt, daß die zentrale städtische Wärmeinsel und die Wärmeinseln der größeren umgebenden Stadtteile in ihrem Kern erhalten geblieben sind. Zum Morgen ist jedoch eine Differenzierung zwischen den Gebäuden und dem Straßennetz eingetreten: Die Dachflächen haben eine deutliche Abkühlung erfahren, während sich die Oberflächentemperatur der Straßen nur wenig verändert hat. Das Straßennetz tritt somit wärmer und kontrastreich in Erscheinung, was die Orientierung im morgendlichen Wärmebild sehr erleichtert. Die stärkere Abkühlung im peripheren Stadtbereich ist zurückzuführen auf eine weniger dichte Bebauung, auf die Nähe zur freien Landschaft und auf den damit verbundenen regeren Luftaustausch.
Am Beispiel des Stadtteils Vaihingen (12) kann man den typischen Unterschied in der thermischen

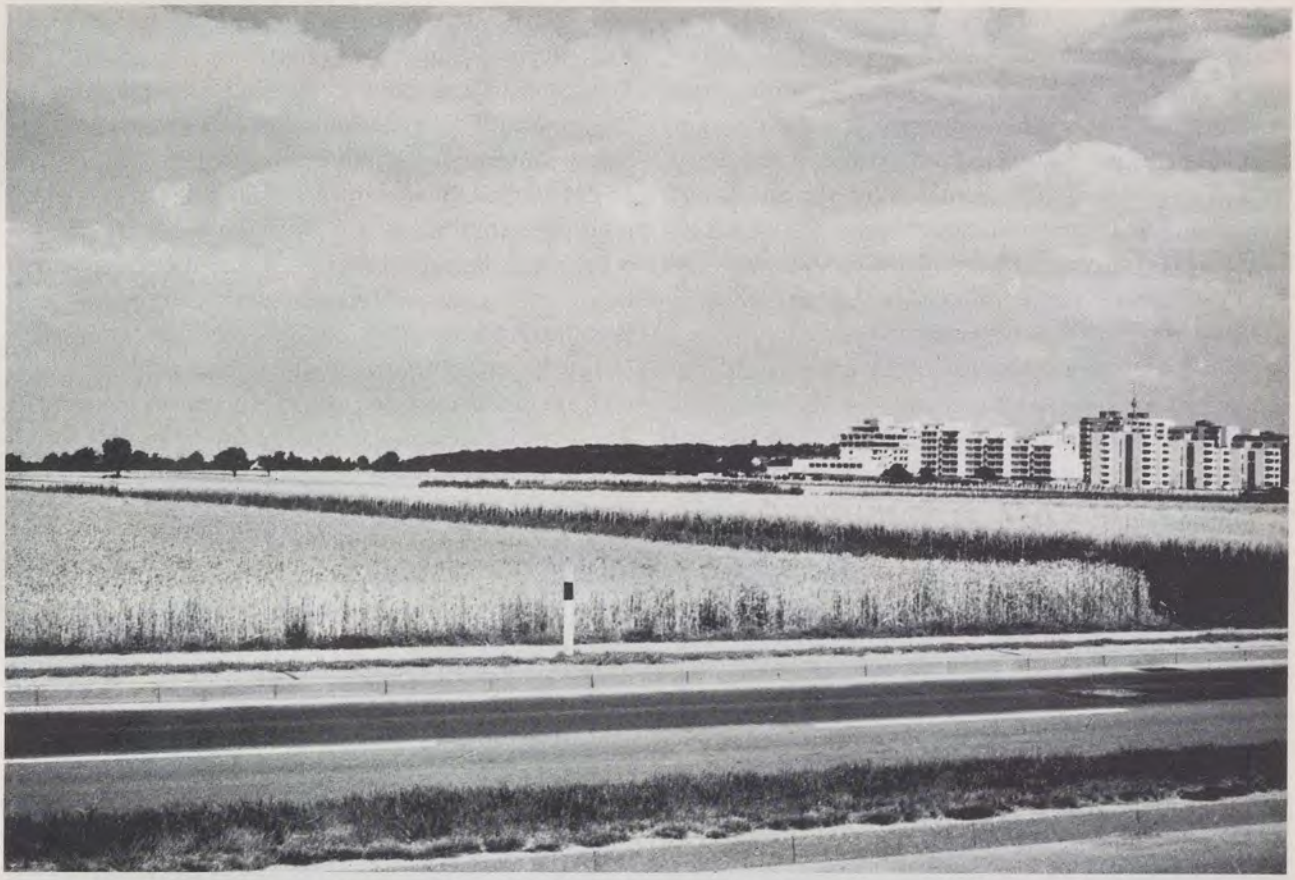


Abb. 8: Die Filder-Landschaft im Süden Stuttgarts wirkt als Kaltluft-Entstehungsgebiet

Struktur zwischen den alten Ortskernen und den neu erschlossenen Industrie- und Gewerbearealen zeigen: Vergleicht man den Abendmeßflug mit dem Meßflug am Morgen, so stellt man die Verlagerung der Wärmezelle vom Gewerbegebiet im Südosten Vaihingens zum alten, dicht bebauten Ortskern im Nordwesten fest. Die Ursache dafür ist in der unterschiedlichen Baustruktur zu suchen, die bei der weitläufigeren Anlage des Gewerbegebietes mit größerem Straßenraster eine stärkere Erwärmung bei Tage und schnellere Abkühlung bei Nacht bewirkt. Im Gegensatz dazu erwärmt sich der alte Ortskern durch Verschattung der engen Straßen bei Tage nicht im gleichen Maße und gibt die gespeicherte Wärme in der Nacht nur langsam wieder ab. Durch die Infrarot-Thermographie wird auch das unterschiedliche thermische Verhalten technischer Oberflächen deutlich. So kühlen die Gleisanlagen beim Hauptbahnhof (3) im Gegensatz zu den Straßenflächen schnell aus. Dies ist auf das relativ große Porenvolumen des Schotterbettes unter den Eisenbahnschienen zurückzuführen. Das Porenvolumen isoliert den Gleiskörper als Ganzes thermisch vom Erdboden, desgleichen auch die einzelnen Schottersteine untereinander, so daß nur eine dünne Schicht der Steinpackung am Tage durch die Sonneneinstrahlung erwärmt wird. Bei der nächtlichen Wärmeausstrahlung erhält diese Schicht keinen Wärmenachschub vom Unterbau her, und das Schotterbett kühlt entsprechend schnell ab.

Der Neckar und die übrigen Wasserflächen, z. B. die Seenkette im Rot- und Schwarzwildpark (10), gehören am frühen Morgen zu den wärmsten Objekten der Stadtlandschaft. Gewässer weisen eine äußerst geringe Tagesschwankung ihrer Oberflächentemperatur auf, da das große Wärmespeichervermögen des Wassers mit der Möglichkeit einer Durchmischung verbunden ist. Somit folgt die Wassertemperatur nicht der allgemeinen nächtlichen Abkühlung.

Ähnlich verhält es sich mit den ausgedehnten Waldgebieten des Stuttgarter Stadtgebietes, die im morgendlichen Wärmebild zu den relativ wärmsten Landschaftsteilen zählen. Ein bemerkenswertes Beispiel dafür liefert der Schurwald, östlich von Stuttgart (5), der sich als weiße und damit besonders warme Fläche darstellt, was gewöhnlich ein Merkmal der Zentren baulicher Verdichtung ist.

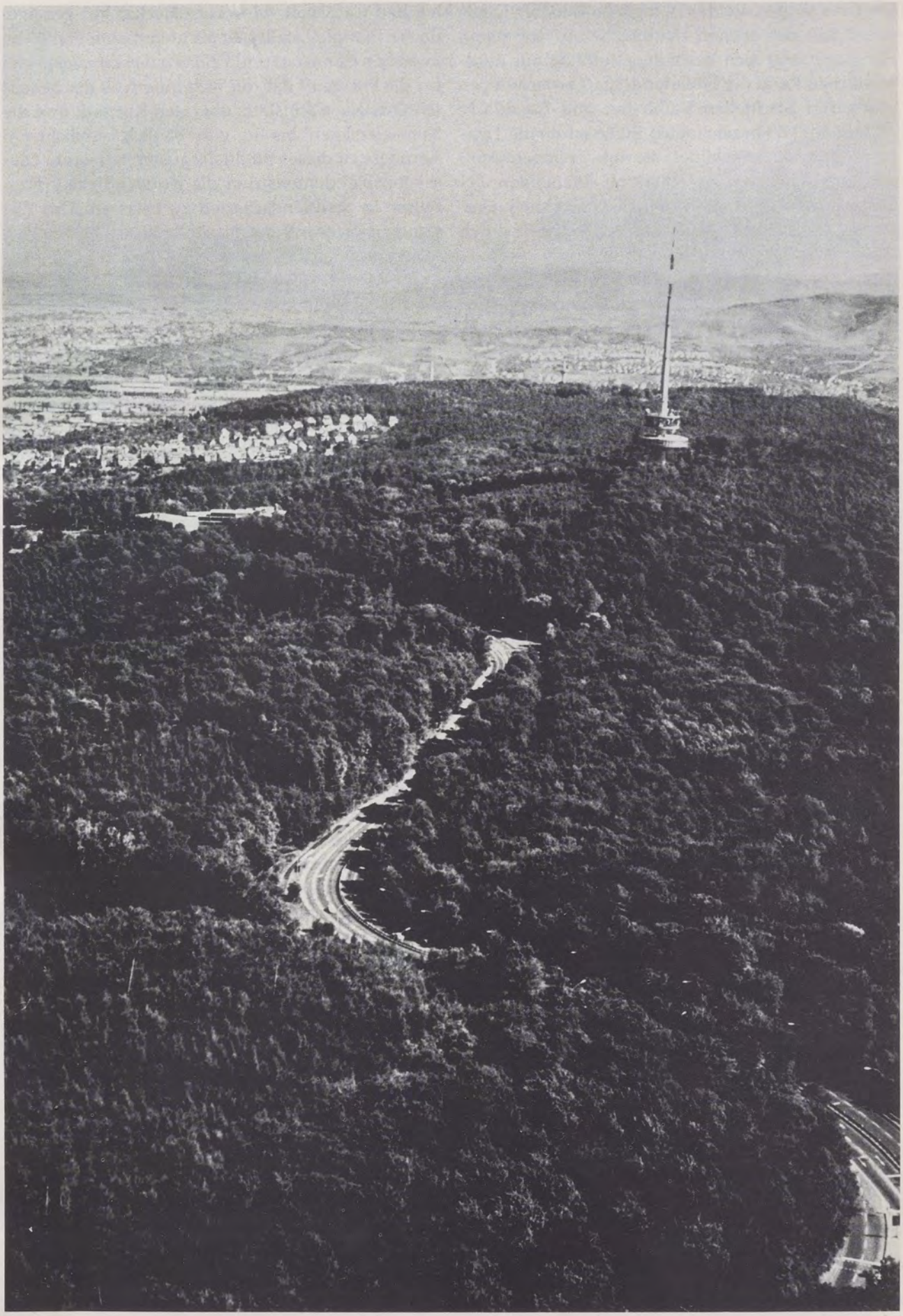
Der Wald übt, wie auch Wasserflächen, eine klimamildernde und temperaturausgleichende Wirkung in der Landschaft aus. Im infraroten Wärmebild erscheint er somit bei Nacht wärmer als das angren-

zende oder umliegende Freiland ohne dichten Bewuchs und Baumbestände.
Diese Wirkung ist auf die senkrechte Zonung und auf die geschlossene Abschirmung des Waldbodens zurückzuführen. Man kann einen Stammraum, einen Kronenraum und einen Wipfelraum unterscheiden. Die Baumkronenoberfläche des belaubten Waldes bzw. immergrünen Nadelholzwaldes stellt die Grenzfläche zur Atmosphäre dar und ist maßgebend für den Wärmeumsatz.
So besteht im Wald bei Tag, aber auch bei Nacht, eine vertikale Temperaturschichtung. Zur Nachtzeit kommt sie dadurch zustande, daß die wärmere Luft im Waldbestand durch kühlere Luft nach oben zu den höheren und höchsten Stellen unter dem Blätterdach verdrängt wird. Das dort bestehende Warmluftpolster wird durch die Abdachung gegenüber der freien Atmosphäre für die Nachtzeit konserviert, und zwar um so länger, je höher und dichter der Waldbestand ist. Strukturen der Oberflächentemperaturen von Waldgebieten deuten somit nicht nur auf unterschiedliche Bestandsdichten und Baumarten, sondern spiegeln auch die Topographie des Waldbodens wider: Höhere Temperaturen kennzeichnen im nächtlichen Infrarotbild auch in den meisten Fällen die höchsten Lagen, aus denen das Warmluftpolster von der an vertikaler Mächtigkeit zunehmenden bodennahen Kaltluftschicht erst später verdrängt werden kann.
Damit wird deutlich, daß Waldgebiete trotz höherer Oberflächentemperatur auch als Produzenten nächtlicher Kaltluft wirken können, allerdings in vergleichsweise beschränktem Umfang, da die Luft über Flächen mit niedriger oder aufgelockerter Vegetation, z. B. Rasenflächen oder Baumwiesen, in klaren Strahlungsnächten stärker abgekühlt wird. Die Tatsache, daß die für die Luftreinhaltung so wichtigen Waldgebiete im nächtlichen Infrarot-Wärmebild keinen thermischen Kontrast bilden zu den Zentren städtischer Bebauung, könnte somit zu tiefgreifenden Mißverständnissen führen, wenn man die Wärmebilder allein auf der Grundlage der Oberflächentemperaturverteilung auszuwerten versucht.

## Temperaturverteilung und lokaler Luftaustausch

Mit der Infrarot-Thermographie werden lediglich Erdboden- bzw. Oberflächentemperaturen erfaßt, die mit der Lufttemperatur der dem Erdboden unmittelbar aufliegenden Luftschicht näherungsweise übereinstimmen. Schon in 2 m Höhe – das ist die Bezugshöhe für meteorologische Messungen der Lufttemperatur – ergeben sich gewöhnlich erhebliche Differenzen zur Temperatur der Bodenoberfläche. Rückschlüsse auf Eigenschaften der Luft, auf ihre Temperatur und Bewegung sind anhand infrarotthermographischer Messungen nur unter Einbeziehung weiterer Informationen möglich.
In der Meßnacht war infolge des wolkenlosen Himmels die Abkühlung am Erdboden rasch vorangeschritten. Die Luft in einiger Höhe über dem Boden folgte dieser Abkühlung in geringerem Ausmaß. Wie durch Messungen mit den vom Deutschen Wetterdienst in Stuttgart zweimal täglich gestarteten Ballonsonden ermittelt wurde, hatte sich um Mitternacht eine 200 m mächtige, dem Erdboden aufliegende Kaltluftschicht ausgebildet. Innerhalb einer solchen sog. Inversionsschicht erfolgt, entgegen dem Normalfall des vertikalen Temperaturverlaufes, Temperaturzunahme mit der Höhe. Die Ausbildung bodennaher Temperaturinversionen ist das Merkmal windstiller Strahlungsnächte. Im Raum Stuttgart kommen diese sog. Bodeninversionen in rund 68% aller Nächte und damit besonders häufig vor.
Innerhalb des dicht bebauten Stadtgebietes sind wegen der dort höheren Lufttemperatur dem Boden aufliegende Inversionen seltener als im Umland. Die Temperaturinversionsschicht ist oft von der Stadtlandschaft abgehoben und liegt wie ein Deckel als Austauschsperrgrenze über einer Durchmischungsgrenze der städtischen Wärmeinsel.
Im Bereich von Temperatur-Umkehrschichten werden nämlich aufgrund der im Luftmeer herrschenden Gleichgewichtsverhältnisse vertikale Luftaustauschbewegungen unterdrückt. Bei Bodeninversionen ist nur ein langsames horizontales Strömen der dem Boden aufliegenden Kaltluft möglich. Dabei ergibt sich an Hanglagen und Geländekanten ein Abkippen und Abgleiten der untersten, spezifisch schwereren Kaltluftschicht. In der somit bewegten Kaltluft findet zwangsläufig eine Durchmischung mit darüber lagernden wärmeren Luftschichten statt, und auch der Erdboden kann nicht so extrem auskühlen.
Die niedrigsten Temperaturen stellen sich dort ein, wo die Luft stagniert; denn nur ruhende Luft kann der Abkühlung des Erdbodens folgen. Somit handelt es sich bei den kühlsten Zonen des Stadtgebietes um beinahe ebene Freilandflächen, um flache Geländemulden und Täler mit stagnierender, vor Ort entstandener Kaltluft.
Mit diesem Hinweis fällt es leichter, den Wärmebildern Informationen über die lokale Luftbewegung zu entnehmen:

Abb. 9: Rechts: Stadtnahe Waldgebiete dienen als Staubfilter für die Stuttgarter Innenstadt



Der Übergang in der freien, nicht bewaldeten Landschaft von der ebenen Hochfläche zur wärmeren Hanglage zeigt sich besonders auffällig am nordwestlichen Rand der Filderlandschaft zwischen den Stuttgarter Stadtteilen Vaihingen und Degerloch: An der mit (17) bezeichneten Stelle wird eine Temperaturgrenze ausgebildet, die mit der bogenförmigen Kante des zum Nesenbachtal abfallenden Geländes identisch ist (vgl. die Reliefaufnahme). Daraus ist ersichtlich, daß die an den Hängen durch Ausstrahlung gebildete Kaltluft sofort talwärts in Bewegung kommt, während sie auf der ebenen Fläche leicht stagniert und niedrige Bodentemperaturen begünstigt. Die Anwendung der Infrarot-Thermographie bietet hier die Möglichkeit, z. B. Weinbaulagen auf mögliche Gefahrenbereiche für Frostentstehung zu untersuchen.

Am Beispiel des Nesenbachtales, das von Vaihingen kommend in den Innenstadtkessel bei (18) im Stadtbezirk Süd einmündet und dessen klimatisches Einzugsgebiet wir eben kennengelernt haben, läßt sich die Wirkung des Geländereliefs auf die Ausbildung thermisch induzierter Luftströme demonstrieren.

Die Funktion des Nesenbachtales als wichtige Frischluftschneise der Innenstadt wird im Vergleich der Stadtteile Süd (18) und West (15) im Wärmebild sichtbar: Bei vergleichbarer Bebauungsstruktur ist die nächtliche Abkühlung in Stuttgart Süd rascher vorangeschritten als im Westkessel. Die Ursache dieser Abkühlung ist eine Luftströmung durch das Nesenbachtal, die als nächtlicher Bergwind auch durch Windmessungen im Stuttgarter Süden nachgewiesen wurde. Die Temperaturen im Tal des Nesenbaches und an seinen Hanglagen sind höher als auf der ebenen Fläche östlich von Vaihingen, wo die Luft stagniert. Das Wärmebild unterstützt somit die Auffassung der Stuttgarter Stadtklimatologen, daß das Nesenbachtal von sperriger Bebauung freigehalten werden muß und gleichzeitig nicht durch einen peripheren Bebauungsgürtel von seinem Kaltluft-Einzugsgebiet abgeriegelt werden darf. Dies wäre der Fall, wenn Vaihingen z. B. mit seinem östlichen Nachbarstadtteil Möhringen zusammenwächst.

Außer der Hauptbelüftungsachse Stuttgarts, dem Nesenbachtal, gibt vor allem auch das Feuerbacher Tal (9) ein Paradebeispiel ab für ein funktionierendes Berg- und Talwindsystem: Der Frischluftverbraucher ist hier der Stadtteil Feuerbach, ein wichtiges Industriegebiet im Norden Stuttgarts (19). Die Belüftung durch lokale Winde kann man wieder an der vergleichsweise großen Temperaturänderung zum morgendlichen Meßtermin feststellen.

Im Wärmebild 6 findet man in dem mit (20) bezeichneten Gebiet eine Frischluftschneise für den Stadtteil Bad Cannstatt. Eine zum Neckar hin geneigte flache Talmulde stellt hier als unverbaute Freifläche zwischen Cannstatt und Fellbach das Einzugsgebiet für die Frischluft dar, die sich innerhalb der bebauten Ortslage Cannstatts über den Kurpark und die Kursaalanlagen bis in den baulich verdichteten Kernbereich dieses Stadtteils ausbreiten kann. Dieses Beispiel demonstriert die Notwendigkeit, Freiräume in Stadtlandschaften zu belassen. Das Zusammenwachsen benachbarter Städte zu einem Bebauungsagglomerat würde die Möglichkeiten lokaler Luftaustauschprozesse unterbinden und somit die klimatischen und lufthygienischen Verhältnisse nachhaltig verschlechtern. Es wird aber auch deutlich, daß nicht nur die Existenz von Frischlufteinzugsgebieten in der Umgebung der Städte notwendig ist. Darüber hinaus müssen die Frischluftschneisen eine möglichst tiefe Verzahnung mit dem bebauten Stadtgebiet aufweisen. Dies ist nur der Fall, wenn die Art und das Maß der baulichen Nutzung sowie die Anordnung von Grünflächen im Wirkungsraum der Luftaustauschbahnen auf deren Belüftungsfunktion abgestimmt sind.

Auch unterhalb der bewaldeten Geländeeinschnitte verwischen die Straßenstrukturen im morgendlichen Wärmebild als Folge der Advektion kühlerer Luft aus dem Stammraum des Waldes. Die nächtliche Kaltluftproduktion der Wälder ist jedoch im Vergleich zur unbewaldeten Landschaft gering und nur an nicht der Sonne exponierten Hangwäldern wirksam. Waldgebiete sind vor allem zur Tagzeit kühler als die bebaute Stadt und können aufgrund dieses thermischen Kontrastes zum Luftaustausch mit der Stadt beitragen. So lösen sich Freiland und Wald im Tagesrhythmus als mögliche Luftspender für die Stadt ab: das Freiland bei Nacht und der Wald am Tage.

Die in Stuttgart vorhandenen lokalen Windsysteme werden auch gefördert durch die beträchtliche Temperaturdifferenz zwischen dem Zentrum der bebauten Ortslage und der freien Landschaft. Durch die Konvektionsbewegung der Luft über wärmeren Oberflächen entsteht ein Sog, der die Wirkung des Geländereliefs nachhaltig unterstützt und in den Städten des Flachlandes der alleinige Antriebsmotor für die nächtlichen sog. Flurwinde ist.

Somit bietet die urbane Wärmeinsel neben ihrem großen Nachteil, die «Deckelbildung» durch Temperaturinversionen zu begünstigen, den Vorteil, bei windschwachen Wetterlagen den Zustrom von Luft aus dem Umland zu fördern.

Das Zusammenfließen kühlerer Luft aus dem Umland im Stadtkern ist freilich nur erwünscht, wenn sie aus lufthygienisch unbedenklichen Gebieten

Abb. 10: Freiräume zwischen den Siedlungs-Schwerpunkten dienen als Einzugsgebiete des lokalen Luftaustausches

kommt und nicht die Gefahr besteht, daß eine Stadt in geschlossener Talkessellage zu einem See verunreinigter, stagnierender Kaltluft aufgefüllt wird.
In diesem Zusammenhang haben die bewaldeten Randhöhen Stuttgarts eine wichtige Funktion für die Verbesserung der Luftqualität. So wirken die stadtnahen Waldgebiete vor allem als Staubkamm und reinigen die Luft, die in den bodennahen, sich über die Randhöhen abwickelnden Luftaustausch mit der Innenstadt einbezogen ist.
Die lokalen Flurwinde bzw. die nächtlichen Berg- und Hangabwinde können freilich nur von der Peripherie in die dicht bebaute Stadtlandschaft eindringen, wo sie sich aufgrund der thermischen Konvektion und wegen der vielen Hindernisse allmählich verlieren. Trotzdem wird im Sinne der Selbstreinigungskraft der Natur durch diese in der Regel sehr schwachen Winde ein wichtiger Belüftungsbeitrag für das Stuttgarter Stadtgebiet erbracht.
Für die Stadtplanung in Stuttgart ergibt sich daraus die Konsequenz, Maßnahmen zur Luftreinhaltung schon am Stadtrand zu ergreifen, um die Vorbelastung der Luft so gering wie möglich zu halten, bevor sie das stärker verunreinigte Stadtzentrum erreicht.
Planerische Maßnahmen haben auch dort anzusetzen, wo die erkannten Bahnen des Luftaustausches durch die Bebauung blockiert sind oder wo die Gefahr besteht, daß eine ungünstige städtebauliche Entwicklung eintreten könnte. Dabei muß stets eine enge Verzahnung zwischen bebautem Stadtgebiet und Vegetationsflächen angestrebt werden.
Dieser Zustand des Ineinandergreifens ist in Stuttgart aufgrund der starken topographischen Gliederung der Landschaft zur Zeit noch gegeben. Darauf ist es im wesentlichen zurückzuführen, daß austauscharme Wetterlagen die lufthygienischen Verhältnisse in dieser Talkesselstadt nicht in katastrophaler Weise verschlechtern.

## Literatur

ROBEL, F., HOFFMANN, U., RIEKERT, A.: Daten und Aussagen zum Stadtklima von Stuttgart auf der Grundlage der Infrarot-Thermographie, Beiträge zur Stadtentwicklung 15 (1978); Hrsg.: Chemisches Untersuchungsamt der Landeshauptstadt Stuttgart. Die «Geometrie der Scanner-Aufnahme» (Abb. 3) wurde entnommen aus: Luftaufnahmen. Wärme-Infrarotmessungen als neue Informationsquelle für Planungszwecke. (Bd. 44 der Schriftenreihe des Siedlungsverbandes Ruhrkohlenbezirk, Essen 1972)