

Abschätzungen zu thermischen und hygrischen Auswirkungen von Oberflächenveränderungen in ausgewählten Stadtteilen von Würzburg

Christoph Beck

Angaben zur Veröffentlichung / Publication details:

Beck, Christoph. 1996. *Abschätzungen zu thermischen und hygrischen Auswirkungen von Oberflächenveränderungen in ausgewählten Stadtteilen von Würzburg*. Würzburg: Geographisches Institut, Universität Würzburg.

Nutzungsbedingungen / Terms of use:

licgercopyright

Dieses Dokument wird unter folgenden Bedingungen zur Verfügung gestellt: / This document is made available under these conditions:

Deutsches Urheberrecht

Weitere Informationen finden Sie unter: / For more information see:

<https://www.uni-augsburg.de/de/organisation/bibliothek/publizieren-zitieren-archivieren/publiz/>



Beck Christoph

**Abschätzungen zu thermischen und hygrischen Auswirkungen von
Oberflächenveränderungen in ausgewählten Stadtteilen von Würzburg**

Bayerische Julius-Maximilians-Universität Würzburg

Abschätzungen zu thermischen und hygrischen Auswirkungen von Oberflächen- veränderungen in ausgewählten Stadtteilen von Würzburg

Diplomarbeit am Geographischen Institut

von Christoph Beck

November 1995

Betreuer der Arbeit: Prof. Dr. J. Jacobeit

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VII
Kartenverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzungen	1
1.2 Methodik	7
1.2.1 Überblick	7
1.2.2 Kartenerstellung und -ausgabe	8
2 Die Untersuchungsgebiete	9
2.1 Auswahlkriterien	9
2.2 Untersuchungsgebiet 1 (Würzburg Heuchelhof - Rottenbauer)	9
2.3 Untersuchungsgebiet 2 (Würzburg Lengfeld)	10
3 Die Würzburger Flächenbilanzen 1983 und 1994	11
3.1 Oberflächenkartierungen als Grundlage meso- klimatologischer Modellbildungen	11
3.2 Die Flächenbilanz 1983	12
3.2.1 Datenlage	13

3.2.2	Ergänzung fehlender Daten	13
3.3	Die Flächenbilanz 1994	14
3.3.1	Datenerhebung und -eingabe	14
3.3.2	Datenaufbereitung	15
3.3.3	Ergebnisse	16
3.4	Vergleich der Flächenbilanzen 1983 und 1994	17
3.4.1	Durchführung	17
3.4.2	Ergebnisse	17
4	Oberflächenspezifische Ausprägungen des thermischen und hygrischen Milieus	22
4.1	Physikalisch-klimatologische Grundlagen oberflächeninduzierter Klimadifferenzierungen	22
4.2	Temperatur- und Feuchtigkeitsmessungen im Sommer 1995	32
4.2.1	Meßfahrten	32
4.2.2	Korrektur und Aufbereitung der Meßdaten	34
4.2.3	Ergebnisse	36
5	Thermische und hygrische Veränderungen 1983 - 1994	46
5.1	Verfahren zur Berechnung der Klimaänderungen	46
5.2	Ergebnisse	47

6	Methodische Erweiterungen des Stadtklimamodells auf Basis der Flächenbilanzergebnisse 1994	51
6.1	Ausgangspunkt und Zielvorstellungen	51
6.2	Variationen der Rastergröße und Einführung von Rasterüberlappungen	55
6.3	Neue Ansätze zur Berechnung der rasterbezogenen Temperaturwerte	66
7	Zusammenfassung und Ausblick	79
Anhang		83
A Tabellen		83
B Karten		85
C Literatur		113

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht über die Arbeitsmethodik	7
Abbildung 2: Veränderung der prozentualen Oberflächenanteile 1983 - 1994 im Untersuchungsgebiet 1	18
Abbildung 3: Veränderung der prozentualen Oberflächenanteile 1983 - 1994 im Untersuchungsgebiet 2	18
Abbildung 4: Histogramme der Oberflächenveränderungen im Untersuchungsgebiet 1	19
Abbildung 5: Histogramme der Oberflächenveränderungen im Untersuchungsgebiet 2	19
Abbildung 6: Stadt - Freiland Unterschiede der Energiebilanz	26
Abbildung 7: Tagesgang der Oberflächentemperaturen verschiedener Materialien . .	27
Abbildung 8: Tagesgang der Lufttemperatur in 2 m Höhe über verschiedenen Oberflächen	28
Abbildung 9: Tagesgänge von Lufttemperatur und Dampfdruck über verschiedenen Oberflächen	29
Abbildung 10: Tageszeitlicher Verlauf von Oberflächentemperaturen	30
Abbildung 11: Meßfahrten am 30.06.1995 - Lufttemperatur in 2 m Höhe; gemittelt für drei Oberflächenarten	42
Abbildung 12: Meßfahrten am 30.06.1995 - Dampfdruck in 2 m Höhe; gemittelt für drei Oberflächenarten	42
Abbildung 13: Meßfahrten am 30.06.1995 - Lufttemperatur in 2 m Höhe; gemittelt für acht Oberflächenarten	43
Abbildung 14: Meßfahrten am 30.06.1995 - Relative Luftfeuchtigkeit in 2 m Höhe; gemittelt für acht Oberflächenarten	43
Abbildung 15: Meßfahrten am 30.06.1995 - Dampfdruck in 2 m Höhe; gemittelt für acht Oberflächenarten	44
Abbildung 16: Meßfahrten am 21.07.1995 - Lufttemperatur in 2 m Höhe; gemittelt für acht Oberflächenarten	44

Abbildung 17: Meßfahrten am 21.07.1995 - Relative Luftfeuchtigkeit in 2 m Höhe; gemittelt für acht Oberflächenarten	45
Abbildung 18: Meßfahrten am 21.07.1995 - Dampfdruck in 2 m Höhe; gemittelt für acht Oberflächenarten	45
Abbildung 19: Untersuchungsgebiet 1, Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert - Mittags; 100 m Rasterkantenlänge; 3 Oberflächenarten differenziert	53
Abbildung 20: Untersuchungsgebiet 1, Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert - Mittags; 100 m Rasterkantenlänge; 8 Oberflächenarten differenziert	54
Abbildung 21: Untersuchungsgebiet 2; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert - Nachts; 40 m Rasterkantenlänge	57
Abbildung 22: Untersuchungsgebiet 2; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert - Nachts; 100 m Rasterkantenlänge	58
Abbildung 23: Untersuchungsgebiet 2; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert - Nachts; 200 m Rasterkantenlänge	59
Abbildung 24: Untersuchungsgebiet 2; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert - Nachts; 500 m Rasterkantenlänge	60
Abbildung 25: Untersuchungsgebiet 2; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert - Nachts; 100 m Rasterkantenlänge, 60 m Überlappung	63
Abbildung 26: Untersuchungsgebiet 2; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert - Nachts; 200 m Rasterkantenlänge, 120 m Überlappung	64
Abbildung 27: Untersuchungsgebiet 2; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert - Nachts; 500 m Rasterkantenlänge, 400 m Überlappung	65
Abbildung 28: Gewichtungsfaktoren unterschiedlich weit vom Zentralraster entfernt Raster	69
Abbildung 29: Untersuchungsgebiet 2; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert - Nachts; 20 m Rasterkantenlänge	72
Abbildung 30: Untersuchungsgebiet 2; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert - Nachts; 20m Rasterkantenlänge, 1 ha-Umgebungs raster; Berechnungsvariante 1	73
Abbildung 31: Untersuchungsgebiet 2; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert - Nachts; 20m Rasterkantenlänge, 1 ha-Umgebungs raster; Berechnungsvariante 2	74

Abbildung 32: Untersuchungsgebiet 2; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert - Nachts; 20m Rasterkantenlänge, $220 \times 220\text{m}^2$ -Umgebungsraaster; Berechnungsvariante 1	75
Abbildung 33: Untersuchungsgebiet 2; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert - Nachts; 20m Rasterkantenlänge, $220 \times 220\text{m}^2$ -Umgebungsraaster; Berechnungsvariante 2	76

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gründe für das Entstehen der städtischen Wärmeinsel	2
Tabelle 2: Oberflächenveränderungen 1983 - 1994	18
Tabelle 3: Klimatologisch relevante physikalische Eigenschaften verschiedener Oberflächen	24
Tabelle 4: Lufttemperatur und Relative Luftfeuchtigkeit über verschiedenen Oberflächen	31
Tabelle 5: Ergebnisse der Meßfahrten vom 30.06.1995	83
Tabelle 6: Ergebnisse der Meßfahrten vom 21.07.1995	84
Tabelle 7: Korrigierte Klima-Meßdaten vom 30.06.1995	37
Tabelle 8: Korrigierte Klima-Meßdaten vom 21.07.1995	38
Tabelle 9: Veränderungen von Lufttemperatur und Dampfdruck in 2 m Höhe 1983 - 1994	47
Tabelle 10: Tageszeitliche Mittelwerte der Temperatur (21.07.1995)	52
Tabelle 11: Deskriptive statistische Kennwerte einiger Temperaturfelder, berechnet auf Basis verschiedener Rastergrößen (Untersuchungsgebiet 1 - Nachts) . . .	56
Tabelle 12: Lufttemperaturen über Grünflächen verschiedener Größe	67
Tabelle 13: Minimal- und Maximaltemperaturen (°C) über verschiedenen Oberflächen (21.07.1995)	68

Kartenverzeichnis

Karte 1: Lage der Untersuchungsgebiete	86
Karte 2: Untersuchungsgebiet 1 - Übersichtskarte	87
Karte 3: Untersuchungsgebiet 2 - Übersichtskarte	88
Karte 4: Untersuchungsgebiet 1 - Prozentuale Oberflächenanteile 1994; Natürliche Oberflächen	89
Karte 5: Untersuchungsgebiet 1 - Prozentuale Oberflächenanteile 1994; Künstliche Oberflächen	90
Karte 6: Untersuchungsgebiet 2 - Prozentuale Oberflächenanteile 1994; Natürliche Oberflächen	91
Karte 7: Untersuchungsgebiet 2 - Prozentuale Oberflächenanteile 1994; Künstliche Oberflächen	92
Karte 8: Untersuchungsgebiet 1 - Veränderung der prozentualen Oberflächenanteile 1983 - 1994; Nichtversiegelte Freiflächen	93
Karte 9: Untersuchungsgebiet 1 - Veränderung der prozentualen Oberflächenanteile 1983 - 1994; Versiegelte Flächen	94
Karte 10: Untersuchungsgebiet 1 - Veränderung der prozentualen Oberflächenanteile 1983 - 1994; Bebaute Flächen	95
Karte 11: Untersuchungsgebiet 2 - Veränderung der prozentualen Oberflächenanteile 1983 - 1994; Nichtversiegelte Freiflächen	96
Karte 12: Untersuchungsgebiet - Veränderung der prozentualen Oberflächenanteile 1983 - 1994; Versiegelte Flächen	97
Karte 13: Untersuchungsgebiet 2 - Veränderung der prozentualen Oberflächenanteile 1983 - 1994; Bebaute Flächen	98
Karte 14: Meßfahrten am 30.06.1995	99
Karte 15: Meßfahrten am 21.07.1995	100
Karte 16: Untersuchungsgebiet 1 - Temperaturveränderungen 1983 - 1994; Vor Sonnenaufgang	101

Karte 17: Untersuchungsgebiet 1 - Temperaturveränderungen 1983 - 1994; Mittags	102
Karte 18: Untersuchungsgebiet 1 - Temperaturveränderungen 1983 - 1994; Nach Sonnenuntergang	103
Karte 19: Untersuchungsgebiet 2 - Temperaturveränderungen 1983 - 1994; Vor Sonnenaufgang	104
Karte 20: Untersuchungsgebiet 2 - Temperaturveränderungen 1983 - 1994; Mittags	105
Karte 21: Untersuchungsgebiet 2 - Temperaturveränderungen 1983 - 1994; Nach Sonnenuntergang	106
Karte 22: Untersuchungsgebiet 1 - Änderungen des Dampfdrucks 1983 - 1994; Vor Sonnenaufgang	107
Karte 23: Untersuchungsgebiet 1 - Änderungen des Dampfdrucks 1983 - 1994; Mittags	108
Karte 24: Untersuchungsgebiet 1 - Änderungen des Dampfdrucks 1983 - 1994; Nach Sonnenuntergang	109
Karte 25: Untersuchungsgebiet 2 - Änderungen des Dampfdrucks 1983 - 1994; Vor Sonnenaufgang	110
Karte 26: Untersuchungsgebiet 2 - Änderungen des Dampfdrucks 1983 - 1994; Mittags	111
Karte 27: Untersuchungsgebiet 2 - Änderungen des Dampfdrucks 1983 - 1994; Nach Sonnenuntergang	112

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Zielsetzungen

Im Kontext anthropogener Klimamodifikationen nimmt, neben dem anthropogen verstärkten Treibhauseffekt, der Themenkomplex Stadtklima eine zentrale Stellung ein.

Während erstgenannter einen Eingriff in makroklimatische Dynamik darstellt, verändern siedlungsspezifische Strukturen und Prozesse das Mikro- und Mesoklima eines Raumes.¹

"Als ein typisches Mesoklima ist es [das Stadtklima; Anm. des Verf.] in das jeweilige zonenspezifische Makroklima eines größeren Raumes eingebettet, unterliegt zugleich jedoch im bodennahen Bereich vielfältigen, kleinräumig differenzierten mikroklimatischen Einflüssen." (ERIKSEN 1983: 7).²

Besondere Relevanz erlangt stadtklimatologische Forschung angesichts der Tatsache, daß ein Großteil der Bevölkerung in Städten lebt - in Europa 71,1% (Stand 1980) (KULS 1993), in der Bundesrepublik Deutschland 71,8% in Gemeinden über 10000 Einwohner (STATISTISCHES BUNDESAMT 1995: 58) - und damit den dort festzustellenden Abwandlungen des natürlichen Klimas ausgesetzt ist.

Die wesentlichen Abweichungen des Stadtklimas gegenüber dem Klima des Umlandes sind die positiven Temperaturanomalien, die zu dem Begriff der städtischen Wärmeinsel³ geführt haben (ERIKSEN 1976), damit verbunden die Ausbildung thermisch bedingter lokaler Windsysteme (Flurwinde), eine Reduzierung der mittleren Windgeschwindigkeit

1 Auf die Diskussion um die Definition und Abgrenzung verschiedener Größenordnungen klimatischer Phänomene und klimatologischer Betrachtungsweisen soll hier nicht eingegangen werden, verwiesen sei in diesem Zusammenhang auf die Arbeiten von WEISCHET (1956), ERIKSEN (1964a, 1964b, 1975) und KRAUS (1983). Im weiteren wird unter Mikroklima das Klima der bodennahen Luftschicht bis 2 m Höhe im Sinne von GEIGER (1961), unter Mesoklima das unter dem Einfluß der lokalen Besonderheiten (Topographie, Oberflächen, ...) abgewandelte Makroklima verstanden (ERIKSEN 1964a: 18).

2 Eine mögliche Beeinflussung des Makroklimas durch städtische Agglomerationen, insbesondere eine globale Temperaturerhöhung als Folge künstlicher Wärmeproduktion, sprechen FLOHN (1970) und ERIKSEN (1976) an. Zweifellos dominieren jedoch die Klimawirkungen im mikro- und mesoskaligen Bereich.

3 Die städtische Wärmeinsel ist kein homogener Bereich erhöhter Temperatur; sie präsentiert sich "... vielmehr wie eine mehrkernige Inselgruppe, in welcher die Quartiere mit unterschiedlichen Baukörperstrukturen auf Grund ihres jeweiligen thermischen Verhaltens als voneinander isolierbare Kerne auftauchen" (WEISCHET 1979: 414). Treffender ist also die Bezeichnung "mehrkernige Wärmeinsel" oder "Wärmearchipel" (ERIKSEN 1976).

bei Zunahme der Böenhäufigkeit (STIEMER 1977), eine Erhöhung der Niederschläge (insbesondere Starkregen) und der Gewitterhäufigkeit (HAVLIK 1981, LANDSBERG 1981; LEE 1984), verringerte Sonnenscheindauer (LANDSBERG 1981) sowie eine Abnahme der Luftfeuchtigkeit und der Nebelhäufigkeit⁴. Die Konzentration von Emittenten in Stadtgebieten führt zu einer Verschlechterung der lufthygienischen Situation; die veränderte Zusammensetzung der Atmosphäre wirkt auch modifizierend auf die Klima-Elemente ein.

Die genannten Charakteristika des urbanen Klimas weisen eine ausgeprägte räumliche und zeitliche Variabilität in Abhängigkeit von Stadtstruktur und Topographie, Jahres- und Tagesperiodik und spezifischer Witterungssituation auf (KRATZER 1956: 71; ERIKSEN 1964b; GOLDREICH 1984; KUTTLER 1985).

Die, nach OKE (1982), maßgeblichen Gründe für die Ausbildung der städtischen Wärmeinsel sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Gründe für das Entstehen der städtischen Wärmeinsel (nach OKE 1988)

Stadtspezifische Strukturen und Prozesse	Veränderte Terme der Energiebilanz
Vergrößerte Oberflächen und Mehrfachreflexion in Straßenschluchten	Verstärkte Absorption kurzwelliger Strahlung
Stärkere Absorption und Gegenstrahlung in der Stadtatmosphäre	Stärkere langwellige Strahlung
Horizonteinengung	Geringere langwellige Ausstrahlungsverluste
Gebäude und Straßenverkehr	Anthropogene Wärmeemissionen
Städtische Baumaterialien	Erhöhte Wärmekapazität
Hoher Versiegelungsgrad; fehlende Vegetation	Geringe Evapotranspiration
Geringe Windgeschwindigkeiten	Reduzierter turbulenter Wärmetransport

⁴ In zahlreichen Veröffentlichungen (z. B. LANDSBERG 1981: 258; FLEMMING 1990: 98) wird für die Stadt eine größere Nebelhäufigkeit, in erster Linie aufgrund der vermehrten Anzahl von Kondensationskernen in der Stadtatmosphäre, angenommen. Dies trifft laut FEZER und KARRASCH (1985) zwar für die Vergangenheit, nicht jedoch für die rezente Situation zu. (FEZER u. KARRASCH 1985).

Zusammenfassend ist die positive Temperaturanomalie der Stadt, aber auch die innerstädtische Differenzierung des Temperaturfeldes, also die Folge unterschiedlicher Energiebilanzen natürlicher und künstlicher Oberflächen.

Die Verminderung der Luftfeuchtigkeit im urbanen Bereich ist Ergebnis der niedrigeren Gesamtverdunstung im Vergleich zum Umland, verursacht durch beschleunigten Oberflächenabfluß und reduzierte Flächenanteile transpirierender Pflanzenbestände (KRATZER 1956: 107; KUTTLER 1985; JACOBET 1986: 65). Eine detailliertere Darstellung der oberflächenspezifischen Temperatur- und Feuchteverhältnisse wird in Abschnitt 4 gegeben.

Auf die Ursachen-Wirkungs-Komplexe der übrigen genannten städtischen Klimamodifikationen wird im Rahmen dieser Arbeit bewußt nicht eingegangen.

Die Konsequenzen der städtischen Überwärmung sind durchaus differenziert zu bewerten. Aus bioklimatologischer Sicht negativ gesehen werden muß mit Sicherheit die Zunahme von Schwülestunden⁵ im innerstädtischen Bereich, die zum Beispiel von BRÜNDL et al. (1986: 267) für München nachgewiesen wurde, andere Elemente des biometeorologischen Wirkungskomplexes⁶ sind, in Abhängigkeit von spezifischer räumlicher und zeitlicher Situation, qualitativ und quantitativ unterschiedlich einzuschätzen (ROTH 1979; JENDRITZKY 1983; WILMERS 1985).

Als positive Auswirkungen werden die Verkürzung der winterlichen Frostperiode; die Abnahme der Frostintensität, der Anzahl der Frost- und Eistage, der Schneedeckendauer sowie der Zahl der Heiztage genannt (KUTTLER 1985). Thermisch induzierte Windsysteme müssen nach der lufthygienischen Qualität der in die Stadt geführten Luftmassen beurteilt werden. Auswirkungen auf die Stadtflora sind die Verlängerung der Vegetationsperiode, eine Verschiebung der phänologischen Phasen und die Ansiedlung

5 Als einfachstes Schwülemaß kann ein Dampfdruck über 14 hPa gelten, andere quantitative Kenngrößen der Schwüle sind ein Dampfdruck über 18.8 hPa (SCHARLAU 1950) eine Äquivalenttemperatur größer-gleich 49 °C, oder das Schwülemaß nach King (MENZ 1989).

6 Der biometeorologische Wirkungskomplex umfaßt den thermischen, den strahlungsbedingten oder aktinischen sowie den lufthygienischen Wirkungskomplex (JENDRITZKY 1993).

bzw. Zuwanderung wärmeliebender Pflanzen, die zum Teil anderen Florengebieten entstammen⁷.

War zu Beginn stadtklimatologischer Forschung der Temperaturunterschied zwischen Stadt und Umland der zentrale Untersuchungsgegenstand - 1833 veröffentlichte L. Howard Meßergebnisse für London, basierend auf Temperaturregistrierungen urbaner und ruraler Stationen, 1855 E. Renou für Paris, 1860 W. C. Wittwer für München (LANDSBERG 1981: 3 ff.; KUTTLER 1993) -, so wurden in der Folgezeit, einhergehend mit der Aufnahme von Meßfahrten in das Instrumentarium stadtklimatologischer Forschungsmethodik, verstärkt Untersuchungen zur Aufhellung der internen Struktur des Stadtklimas durchgeführt. In jüngerer Vergangenheit, im wesentlichen seit den frühen siebziger Jahren (OKE 1982), wurden die Ursachenkomplexe des in der Stadt modifizierten Austausches von Energie und Impuls zwischen Atmosphäre und Erdoberfläche meßtechnisch detaillierter untersucht und Modelle zur Analyse und Prognose der Klimaverhältnisse in Stadtgebieten entwickelt (MYRUP 1969; NUNEZ u. OKE 1980; TERJUNG u. O'ROURKE 1980, 1981; OKE 1982; ZDUNKOWSKI et al. 1983). Modellbildungen in der Stadtklimatologie können nach verschiedenen Gesichtspunkten gruppiert werden: Nach der Einbeziehung der zeitlichen Dimension, in statische und dynamische Modelle; nach der zugrundeliegenden Modelltheorie in physikalische, empirische und empirisch-statistische, und numerische Modelle; unter Berücksichtigung der räumlichen Größenordnung der modellierten Prozesse in mikroskalige und mesoskalige sowie gekoppelte Modelle⁸ (LANDSBERG 1981: 153 ff.; OKE 1984; WANNER 1984; KERSCHGENS 1988). Eine Möglichkeit das thermische Milieu einer Stadt flächendeckend zu erfassen, bietet die in den letzten Jahren entwickelte Infrarot-Thermographie, die Scannerdaten können hierbei von unterschiedlichen Fernerkundungsplattformen aus erhoben werden (Flugzeug oder Satellit z. B. Landsat-TM-Daten) (GEHRKE et al. 1977; MAHLER u. STOCK 1977; GOßMANN et al. 1981; GEHRKE 1982; GOßMANN 1983; BAUMGARTNER et al. 1985; KIM 1992). Bei diesem Verfahren wird allerdings nicht die, für das Klimaempfinden des

⁷ Im Euro-westsibirischen Florengebiet in Mitteleuropa zum Beispiel aus dem südlich angrenzenden Mediterranen Florengebiet.

⁸ OKE (1984) unterscheidet UCL- (Urban Canopy Layer) Models und UBL- (Urban Boundary Layer) Models, bezugnehmend auf die, von ihm (1976) getroffene, Differenzierung der stadtbeeinflussten Atmosphäre in eine "canopy layer" unter Dachniveau und eine "boundary layer" über Dachniveau.

Menschen bedeutsame, Temperatur in der bodennahen Luftschicht bis 2 m Höhe, sondern die Oberflächentemperatur registriert, deren Kenntnis keinen verlässlichen Schluß auf erstgenannte zuläßt (GOßMANN u. AHRENS 1978). Kritisch anzumerken sind auch das noch nicht vollständig gelöste Problem der Korrektur des Atmosphäreneinflusses, die je nach oberflächenspezifischem Emissionsvermögen unterschiedliche Nichtübereinstimmung der gemessenen Strahlungstemperatur mit der realen Oberflächentemperatur und die zweidimensionale Abbildung eines dreidimensional strukturierten Temperaturfeldes (GOßMANN et al. 1981; BAUMGARTNER et al. 1985: 30 ff.).

Die stadtklimatischen Verhältnisse in Würzburg wurden in der Vergangenheit mehrfach im Rahmen von Examensarbeiten am Geographischen Institut der Universität untersucht. TEICHTWEIER (1983) stellte auf der Basis mehrerer Meßfahrten die thermischen und hygrischen Verhältnisse im Stadtgebiet, insbesondere der Innenstadt, dar. Das thermische Verhalten stadtypischer Oberflächen war zentraler Gegenstand der Arbeiten von PLENDL (1984) und RÜCKERT (1984); HASSELBERGER (1984) befaßte sich mit den Windverhältnissen in Würzburg. Im Rahmen stadtoökologischer Untersuchungen (SCHMITT 1990) wurden von 1982 bis 1986 Meßfahrten durchgeführt und 1985 Landsat-TM-Daten des Kanals 6 (Spektralbereich 10-12 Mikrometer) ausgewertet, 1984 wurde für dieses Projekt auch eine Flächenbilanz auf der Basis von Color-Infrarot-Luftbildern durchgeführt, die eine unverzichtbare Grundlage vorliegender Arbeit darstellt. KESSLER (1993) schließlich, bearbeitete eine bioklimatologische Fragestellung, ausgehend von Passantenbefragungen und Messungen der Temperatur und Luftfeuchte in Würzburg.

Die vorliegende Untersuchung soll einen Beitrag leisten zur Kenntnis der oberflächenstrukturbedingten klimatischen Differenzierung im urbanen Bereich. Für ausgewählte Stadtteile Würzburgs soll festgestellt werden, welche raum-zeitlich differenzierten, qualitativen und quantitativen Effekte Oberflächenveränderungen auf das thermische und hygrische Milieu zeitigen. Eine Annäherung an diese Fragestellung ist nicht nur aus wissenschaftlicher Sicht von Interesse, sie ist auch in hohem Maße planungsrelevant, kann sie doch Hinweise geben zu einer Berücksichtigung des Klimas, als wichtige Komponente städtischer Ökosysteme, bei der Flächennutzungs- und Bebauungsplanung.

Betrachtet werden hierbei zwei Zeitpunkte - 1983 und 1994, für die detaillierte Flächenbilanzen der Untersuchungsgebiete bereits vorliegen, bzw. im Rahmen der Arbeit erstellt werden.

Durch die rechnerische Verknüpfung von, im Verlauf von Meßfahrten erhobenen, Klimameßdaten aus 2 m Höhe mit Oberflächenparametern wird eine flächenmäßige Darstellung der bioklimatisch relevanten thermischen und hygrischen Situation zu drei Tageszeiten (Morgens, Mittags, Nachts) erreicht. In dieser modellhaften Wiedergabe der vom Menschen wahrgenommenen Temperatur- und Feuchtigkeitszustände ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber den oben erwähnten Thermalkartierungen zu sehen.

Dieser Vorgehensweise zugrundeliegend ist die, zwar generalisierende aber durchaus berechnete Annahme, daß jede Oberflächenart für sie typische thermische und hygrische Verhältnisse in der ihr auflagernden bodennahen Luftschicht bewirkt. Natürlich wirken daneben auch andere, nicht oberflächenbedingte, Faktoren klimabeeinflussend (Jahres- und Tageszeit, Witterungssituation, Lage im Relief, makro- und mesoklimatische Windsysteme), die nicht alle in das Modell integriert werden. Daraus resultiert eine vereinfachte, unvollständige Repräsentation des realen Systems, die aber Modellen generell immanent ist (WIRTH 1979: 128 ff.).

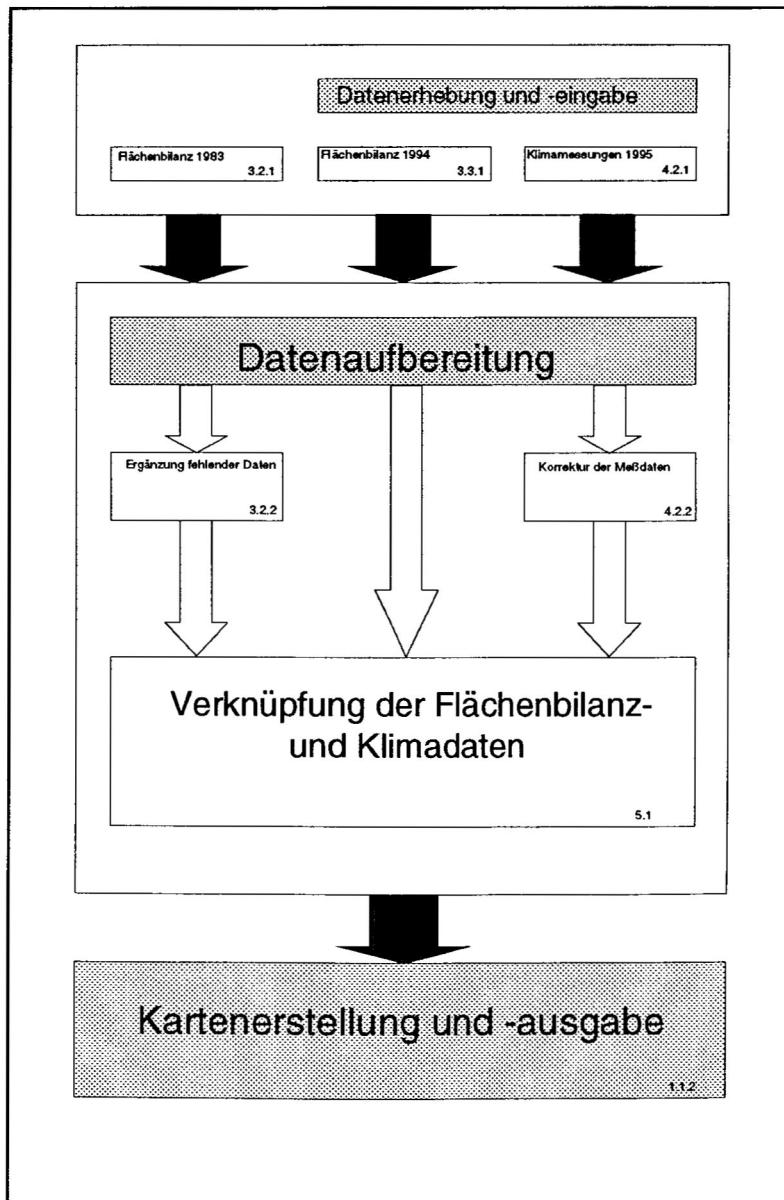
In einem anschließenden Arbeitsschritt sollen sodann sinnvolle methodische Erweiterungen des verwendeten statischen empirischen Stadtklimamodells, das auch schon in anderen Arbeiten (HASE 1990) verwendet wurde, auf Basis der, im Rahmen dieser Arbeit erhobenen, aktuellen Flächenbilanzdaten, entwickelt und kritisch beurteilt werden.

1.2 Methodik

1.2.1 Überblick

Eine Übersicht der Arbeitsmethodik vermittelt Abb. 1. Detailliertere Ausführungen zu den einzelnen Arbeitsschritten folgen in den in der Abbildung angegebenen Abschnitten.

Abbildung 1: Übersicht über die Arbeitsmethodik



1.2.2 Kartenerstellung- und Ausgabe

Dem Thema dieser Arbeit entsprechend erfolgt die Präsentation der Ergebnisse in erster Linie in Form von Karten.

Um ein einheitliches Erscheinungsbild der Karten zu erreichen wurde ein Fortran-Programm (unter Mitverwendung der Graphik-Unterprogramm-bibliothek ERLGRAPH) entwickelt, das sowohl die kartenmäßige Darstellung der topographischen Grundinformation und des gesamten Kartenlayouts als auch die kartographische Umsetzung der Ergebnisse in einem Arbeitsschritt ermöglicht. Die Programmformulierung erlaubt dabei die problemlose Anpassung des Programms an verschiedene Erfordernisse (Raster- oder Isoliniendarstellung, Ausschnittwahl und -vergrößerung).

Klima- und Topographiedaten werden von diesem Programm als ASCII-Dateien eingelesen und weiterverarbeitet; während erstere nach den der Kartenerstellung vorangegangenen, im folgenden beschriebenen Arbeitsschritten bereits in dieser Form vorliegen, mußten letztere erst erhoben und in dieses Datenformat transformiert werden.

Zu diesem Zweck wurden die entsprechenden Informationen (Stadtteilgrenzen, Siedlungsflächen, Strassen, Wald, Gewässer) mit dem Geographischen Informationssystem ARC-INFO von Topographischen Karten 1 : 25000 eindigitalisiert und nach Verarbeitung in ASCII-Format konvertiert. Die Selektion der digitalisierten Sachverhalte erfolgte hierbei mit der primären Maßgabe eine (stark generalisierte) Darstellung der Untersuchungsgebiete zu ermöglichen und damit dem Kartenbetrachter zur Orientierung zu dienen.

Die auf Großrechner erstellten Plot-Dateien wurden auf PC-Festplatte kopiert, dort mit der ERLGRAPH-PC-Version in druckbare Dateien umgewandelt und über einen Plotter ausgegeben.

2 Die Untersuchungsgebiete

2.1 Auswahlkriterien

Für die Untersuchung sind solche Gebiete von besonderem Interesse, für die seit der zuletzt durchgeführten Flächenbilanz 1983 eine oberflächenverändernde, damit potentiell klimamodifizierende Dynamik festzustellen ist. Das heißt, insbesondere Gebiete, in denen nennenswerte Umwandlungen natürlicher in künstliche Oberflächen und/oder umgekehrt erfolgten.

Da die Flächenbilanz 1983 flächendeckend (Ausnahmen siehe 3.2.1) für das Stadtgebiet Würzburgs durchgeführt wurde und deren Daten unverzichtbare Grundlage des Flächenbilanz-Vergleichs sind, außerdem die Luftbild-Befliegung von 1994 als Basis der aktuellen Flächenbilanz das entsprechende Areal abdeckt, kamen hauptsächlich innerhalb der Stadtgrenze gelegene Bereiche als Untersuchungsgebiete in Frage.

Ausgewählt wurden schließlich die beiden, im folgenden kurz beschriebenen Gebiete, Heuchelhof - Rottenbauer und Lengfeld, deren Lage Karte 1 zu entnehmen ist.

2.2 Untersuchungsgebiet 1 (Würzburg Heuchelhof-Rottenbauer)

Das Gebiet umfaßt im wesentlichen den Stadtteil Heuchelhof-Rottenbauer sowie Teile von Heidingsfeld und einige außerhalb des Stadtgebietes gelegene Flächen (siehe Karte 2) - insgesamt eine Fläche von 17 km².

Der topographisch tiefste Punkt mit ca. 167 m NN ist die Wasserfläche des Mains in der Nord-Ost-Ecke des Gebietes, die größte Höhe wird auf der Lindflurhöhe im Südosten erreicht (314 m NN). Der flächenmäßig größte, auf der Gäufläche gelegene Bereich, weist absolute Höhen von über 280 m NN bei sehr geringen relativen Höhenunterschieden auf. Eine ausgeprägtere Reliefierung ist lediglich in den Hangbereichen des Maintals und entlang der kleineren Tälchen (Fuchsstädter Bach, Heuchelbach, Reichenberger Bach) festzustellen.

Bedeutende Anteile der Gäuflächenbereiche sind ackerbaulich genutzt, größere zusammenhängende Waldareale, teilweise in Gebüsch übergehend, liegen im zentralen Bereich des Untersuchungsgebietes entlang des Heuchelbaches sowie an der westlichen und östlichen Gebietsgrenze. Die fossilen Prallhänge des Maintales sind geprägt von Gebüschformationen, Streuobstbeständen und Pflanzengesellschaften verschiedener Weinbergs-Sukzessionsstadien. Siedlungsschwerpunkte bilden im Süden des Gebietes der Stadtteil Rottenbauer, im nördlichen Bereich des Ausschnittes die - schon im Talbereich gelegenen - noch erfaßten Anteile Heidingsfelds und daran nach Süden anschließend der, durch seine kreisförmigen Bebauungsstrukturen charakteristische Stadtteil Heuchelhof.

2.3 Untersuchungsgebiet 2 (Würzburg Lengfeld)

Karte 3 vermittelt einen Überblick über das 14 km² umfassende Untersuchungsgebiet Würzburg-Lengfeld, das außer diesem Stadtteil noch den Stadtteil Lindleinsmühle, Bereiche der Stadtteile Versbach, Grombühl und Frauenland sowie geringe, nicht dem Stadtgebiet zugehörige Flächenanteile beinhaltet.

Im Vergleich zu Untersuchungsgebiet 1 weist dieses Gebiet eine bedeutend stärkere morphologische Differenziertheit auf. Pleichachtal und Kürnachtal - von Norden bzw. Nordosten in den Würzburger Talkessel einmündend - führen zum tiefstgelegenen Punkt im Südwesten des Gebietes (ca. 185 m NN). Von diesen, in die Gäufläche eingeschnittenen Tiefenlinien steigt das Gelände auf Höhen bis ca. 270 m NN (höchster Punkt: Grasholz) an, ohne dabei aber das Niveau der Gäufläche zu erreichen. Die südwestliche Gebietshälfte ist, ausgehend von den Talgründen, sehr stark von bebauten und versiegelten Strukturen geprägt, während im durchschnittlich höhergelegenen und ebeneren Nordostteil ackerbauliche Nutzung dominiert. Wald- und Gebüschformationen sind ebenso wie Wasserflächen nur in kleinflächigen Arealen vertreten.

3 Die Würzburger Flächenbilanzen 1983 und 1994

3.1 Oberflächenkartierungen als Grundlage meso-klimatologischer Modellbildungen

Der Gedanke, über die Erfassung der Oberflächenstruktur eines Gebietes, Aussagen zur räumlich differenzierten klimatischen Situation zu ermöglichen ist nicht neu. Voraussetzung für in diese Richtung zielende Arbeiten ist die Einteilung der mannigfaltigen Oberflächenausprägungen in möglichst eindeutig definierte Klassen, für die ein jeweils typisches klimatisches Verhalten angenommen werden kann. Neben der von mir in dieser Arbeit verwendeten Klassifizierung, die in fast identischer Form von HASE (1990) und stark vereinfacht von SCHMITT (1990) eingesetzt wurde und die weiter unten näher erläutert wird, gibt es eine Reihe von Alternativmöglichkeiten, von denen ich einige kurz vorstellen möchte.

MAROTZ u. COINER (1973) unterscheiden innerhalb der übergeordneten Klassen - Natürliche bzw. Künstliche Oberflächen - insgesamt 13 Oberflächenarten, wobei eine Berücksichtigung der vertikalen Strukturierung, die für das klimatische Verhalten von großer Bedeutung ist, nicht stattfindet. Kritisch zu beurteilen ist auch die Vorgehensweise für jedes erhobene 90 m × 90 m-Raster nur den dominierenden Typ zu erfassen. Für Marburg wurde eine Kartierung auf 25 m²-Raster Basis durchgeführt (MÜLLER 1982), deren zugrundeliegende 13 Klassen umfassende Flächentypisierung, abgesehen von einer nochmaligen Differenzierung innerhalb einiger Klassen (z. B. Wald in Nadel- und Laubwald), im wesentlichen der in vorliegender Arbeit verwendeten entspricht.

KARRASCH (1992a, 1992b) beschreibt am Beispiel von Heidelberg die rastermäßige Erfassung von Kenngrößen für Versiegelungsgrad und Grünflächenanteil als Teilaspekt klimarelevanter Kartierungen.

Die für das STADTKLIMA BAYERN-Projekt entwickelte Einteilung in 31 Oberflächenbedeckungsarten (BRÜNDL et al. 1986: 138) differenziert zum Teil, wie auch AUER 1976 für St. Louis, zwischen Kombinationen verschiedenartiger Flächen, sozusagen Oberflächenvergesellschaftungen (z. B. mehrgeschossiger Wohnungsbau mit besserer Ausstattung an halböffentlichem und öffentlichem Siedlungsgrün), deren

Abgrenzung meiner Meinung nach nicht unproblematisch ist, auch ist die Notwendigkeit mancher Unterscheidung nicht ganz einsichtig (z. B. zwischen Autobahnen und Asphaltflächen). Wie bei MAROTZ u. COINER (1973) wird auch bei dieser Methodik nur die jeweils dominierende Oberflächenbedeckungsart aufgenommen, was zusammen mit der zwischen 100, 250 und 1000 m variierenden Rasterkantenlänge eine stark eingeschränkte inhaltliche und räumliche Auflösung bedingt.

Neben diesen, auf Luftbildauswertung basierenden, Methoden besteht natürlich auch die Möglichkeit Satellitendaten zur Oberflächenkartierung heranzuziehen, die den großen Vorteil aufweisen schon als Rasterdaten vorzuliegen - Landsat-TM-Daten beispielsweise als $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ -Rasterdaten, die relativ problemlos in andere Datenverarbeitungssysteme übernommen werden können. Als wesentlicher Nachteil ist allerdings anzumerken, daß diese Rasterdaten schon einen generalisierten Eindruck der realen Oberflächenverhältnisse geben, das heißt, innerhalb eines Pixels (Rasters) können keine weiteren Differenzierungen mehr festgestellt werden, während Luftbilder sogar die Identifikation einzelner Bäume ermöglichen. Der Einsatz von Satellitendaten ist also eher bei der Bearbeitung größerer Räume anzuraten, wo nicht so sehr die kleinräumige Oberflächenstruktur, sondern vielmehr das grobe Oberflächenmosaik von Interesse ist. Die Möglichkeit auch räumlich höher aufgelöste Kartierungen auf der Grundlage von Satellitendaten durchzuführen könnten neue Aufnahmesysteme, wie z. B. der neuentwickelte Modulare-Multispektralscanner MOMS - 02 mit einer Bodenpixelgröße von $4,5\text{ m} \times 4,5\text{ m}$ bieten.

3.2 Die Flächenbilanz 1983

Im Kontext stadtökologischer Untersuchungen in Würzburg wurde 1984, auf der Basis einer am 16. Juli 1983 erfolgten Infrarot-Farbbildbefliegung im Maßstab 1 : 5000, eine detaillierte Flächenbilanz des Stadtgebietes durchgeführt.

Für $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ -Raster wurden die prozentualen Anteile der drei Oberflächentypen Nichtversiegelte Freiflächen, Versiegelte Flächen und Bebaute Flächen festgestellt und daraus für, an das Gauß-Krüger-Netz angepaßte, $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ -Raster die jeweiligen Anteilswerte errechnet (SCHMITT 1983; BUCHHAUPT 1986). Diese Daten wurden, als wesentlicher Bestandteil des Kommunalen-Informations-Systems (KIS) der Stadt

Würzburg (SCHMITT 1990), in den Computer eingegeben und standen für vorliegende Arbeit in einer ASCII-Datei zur Verfügung.

Aus dieser Datei wurden die, für die Untersuchungsgebiete relevanten, Daten selektiert und auf zwei getrennte Dateien verteilt.

3.2.1 Datenlage

Die erwähnte Datei enthält für jedes bearbeitete 100 m × 100 m-Raster neben den Lagekoordinaten und den Ergebnissen der Flächenbilanz eine Reihe anderer Daten, von denen im folgenden allerdings nur die Angabe der Höhe ü. NN Verwendung findet.

Von insgesamt 1800 1 ha-Rastern im Untersuchungsgebiet 1 bzw. 1400 Rastern im Untersuchungsgebiet 2 lagen für 266 bzw. 137 Raster keine Daten vor (siehe Karten 2 und 3). Diese nicht bearbeiteten Raster liegen zum Großteil außerhalb des Stadtgebietes; 60 Raster im Untersuchungsgebiet 2 konnten 1983 nicht kartiert werden, da sie in militärisch genutzten Flächen liegen, für die keine Luftbildfreigabe erteilt wurde.

3.2.2 Ergänzung fehlender Daten

Die für die Untersuchungsgebiete fehlenden Daten wurden im Sommer 1995, unter Anwendung der beschriebenen Methodik der Flächenbilanz 1983, nacherhoben. Die hierzu benötigten Luftbilder der Befliegung von 1983 wurden mir freundlicherweise vom Stadtplanungsamt der Stadt Würzburg zur Bearbeitung im Amt zur Verfügung gestellt.

Nicht berücksichtigt werden konnten dabei die im Untersuchungsgebiet 2 gelegenen militärisch genutzten Gebiete (siehe Karte 3), da die entsprechenden Luftbilder leider nicht vorlagen.

Zur Ergänzung der ebenfalls fehlenden Höhenwerte wurden die Höhenangaben für die fraglichen Raster den entsprechenden Topographischen Karten 1 : 25000 entnommen und, wie auch die Flächenbilanzdaten, den nunmehr vervollständigten Dateien hinzugefügt.

3.3 Die Flächenbilanz 1994

Die Befliegung des Würzburger Stadtgebietes mit Stadtrandbereichen am 30. April 1994 bot die Möglichkeit zur Durchführung einer aktuellen Flächenbilanz, um damit die Datengrundlage für den durchzuführenden Flächenbilanzvergleich zu vervollständigen.

Die Ergebnisse dieser Befliegung liegen in Form von Color-Diapositiven im Maßstab 1 : 5500 bei der Stadt Würzburg vor. Von den für die Untersuchung relevanten Dias wurden Kontaktabzüge in Auftrag gegeben, die nun am Geographischen Institut (Prof. JACOBET) verfügbar sind. Die von den einzelnen Aufnahmen erfaßten Flächen und die Bildnummern sind in den Karten 2 und 3 dargestellt.

Der Vorteil der leichten Identifizierbarkeit von Vegetationsflächen, den die Color-Infrarotbilder der Befliegung 1983 bieten⁹, ist bei Colordiapositiven leider nicht gegeben, was die Durchführung der Flächenbilanz 1994 erschwerte.

3.3.1 Datenerhebung und -eingabe

Die Erhebung der Flächenbilanz 1994 erfolgte, mit einigen Modifikationen, in enger Anlehnung an die von HASE (1990) für die Flächenbilanz der Stadt Augsburg verwendete Methodik. Gegenüber der Würzburger Flächenbilanz von 1983 wurden einige wesentliche Erweiterungen eingeführt, die zwar nicht für den Vergleich von Bedeutung sind, die Datenbasis für die weiterführenden Arbeiten (siehe 6) und für eventuelle zukünftige Untersuchungen mit vergleichbarer Zielsetzung jedoch erheblich verbessern.

In einem ersten Arbeitsschritt wurde als Orientierungsgrundlage für die beiden Untersuchungsgebiete auf vergrößerten Ausschnitten Topographischer Karten das Gauß-Krüger-Gitter in 100 m-Abständen eingetragen. Für die Feststellung der prozentualen Flächenanteile der verschiedenen Oberflächenarten auf der Basis von 20 m × 20 m-Rastern wurde ein, auf Folie im Luftbildmaßstab angelegtes, 500 m × 500 m-Raster mit 20 m Gitternetzeinteilung auf den Luftbildern orientiert und die jeweiligen Oberflächenanteile für jedes 20 m × 20 m-Raster geschätzt. Aus Gründen der Übersichtlich-

⁹ Das "photographische Infrarot" umfaßt den Wellenlängenbereich zwischen 0,7 - 0,9 µm, der von gesunden Pflanzen aufgrund mehrfacher interner Reflexion im Mesophyll besonders stark reflektiert wird; deshalb wird grüne Vegetation in Infrarot-Falschfarbenbildern in einem kräftigen Rot wiedergegeben (LÖFFLER 1985: 174).

keit erfolgte die Erhebung dabei jeweils für die $25 \times 20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ -Raster eines $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ -Rasters in einem übergeordneten Arbeitsschritt, der auch die eventuell notwendige Neuorientierung des Folienrasters beinhaltete.

Zwischen folgenden acht Oberflächenarten wurde dabei differenziert:

- 1 - Wiese**
- 2 - Gebüsch**
- 3 - Wald und Baumformationen**
- 4 - Wasser**
- 5 - Acker**
- 6 - Versiegelte Flächen**
- 7 - Niedrige Bebauung**
- 8 - Hohe Bebauung**

Auf diese Weise wurden in den beiden Untersuchungsgebieten für insgesamt 80000 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ -Raster (davon 45000 im Untersuchungsgebiet 1 und 35000 im Untersuchungsgebiet 2) die spezifischen Oberflächenanteile ermittelt und auf zwei Dateien verteilt in den Computer eingegeben; insgesamt also 640000 Einzeldaten. Jede Zeile der Dateien enthält Rechts- und Hochwert der süd-westlichen Rasterecke in Gauß-Krüger-Koordinaten, die prozentualen Oberflächenanteile der oben genannten Oberflächenarten und die Höhe ü. NN der übergeordneten $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ -Fläche.

3.3.2 Datenaufbereitung

Angesichts der großen Datenmenge wurden die weiteren Schritte der Datenverarbeitung auf einem HP-Großrechner des Rechenzentrums der Universität Würzburg unter dem Betriebssystem UNIX durchgeführt.

Vor der Durchführung weiterer Arbeitsschritte wurde zunächst das gesamte Datenkollektiv auf Vollständigkeit und Plausibilität geprüft und eventuelle Fehler korrigiert.

Für den Vergleich der aktuellen Bilanz mit den 1983 erhobenen Daten, wurden die $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ -Daten zu 1 ha-Rastern aggregiert, die den entsprechenden Rastern der Flächenbilanz 1983 deckungsgleich sind. Zugleich erfolgte die Zusammenfassung der

acht oberflächenspezifischen Anteilswerte zu den 1983 verwendeten Kategorien. Aus den Werten für Wiesenflächen, Gebüsch, Wald, Wasser und Acker wurde der Anteil Nichtversiegelter Freiflächen, aus den Anteilen Niedriger und Hoher Bebauung der Anteil Bebauter Flächen ermittelt; der Wert für Versiegelte Flächen konnte aus einsichtigen Gründen unverändert beibehalten werden.

3.3.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Flächenbilanz 1994 sind in den Karten 4, 5 und 6, 7 auf 100 m × 100 m-Raster-Basis dargestellt.

Pro Untersuchungsgebiet wurden je zwei Karten erstellt, von denen eine die Oberflächenanteile der natürlichen Oberflächen (Vegetations- und Wasserflächen, Ackerflächen) und die andere die der künstlichen Oberflächen (Versiegelte und bebaute Flächen) zeigt; mit überlagerten Symbolen wird zusätzlich auf den, innerhalb der jeweiligen Oberflächenklasse dominierenden, Oberflächentyp hingewiesen. Der Wertebereich - 0 -100% - wurde für die Darstellung in sieben Klassen unterteilt¹⁰, dabei erfolgte die Positionierung der 10% umfassenden Klasse jeweils an dem Ende des Wertintervalls, an dem die größeren Häufigkeiten auftraten. Die Klassengrenzen fallen jeweils der weiter von Null entfernten Klasse zu; dies gilt für alle folgenden Klasseneinteilungen.

Die einzelnen Karten sollen hier nicht näher erläutert werden; die Grundstrukturen der Oberflächendifferenzierung wurden bereits in 2 beschrieben, auf die Veränderungen gegenüber der Situation von 1983 wird im folgenden Abschnitt ausführlich eingegangen. Von Interesse sind die Karten in erster Linie in Zusammenhang mit den in Abschnitt 6 durchgeführten Untersuchungen auf Basis der aktuellen Flächenbilanzdaten.

¹⁰ Zur Ermittlung der Klassenanzahl wurde die Faustregel von STURGES verwendet (BAHRENBURG et al. 1990: 32). Diese Faustregel lautet: $k = 1 + 3,32 \cdot \lg n$ (k = Anzahl der Klassen, n = Anzahl der Objekte).

3.4 Vergleich der Flächenbilanzen 1983 und 1994

Um die Oberflächenveränderungen, die in den Jahren zwischen 1983 und 1994 stattfanden zu erfassen, wurde ein Vergleich der Flächenbilanzen, auf Basis der 1983 berücksichtigten drei Oberflächentypen, durchgeführt. Die resultierenden Ergebnisse erleichtern zudem die Interpretation der damit einhergehenden Veränderungen des thermischen und hygrischen Milieus (siehe 5).

3.4.1 Durchführung

Durch die Subtraktion des 1983 ermittelten Flächenanteils von dem für 1994 festgestellten Wert wurde für jedes 1 ha-Raster die Veränderung des prozentualen Flächenanteils jeder der drei Oberflächenarten berechnet.

Um einen Überblick über die Entwicklung, bezogen auf die Gesamtflächen der Untersuchungsgebiete zu erhalten, wurden für die beiden zu vergleichenden Zeitpunkte die oberflächenspezifischen Anteile aller Raster aufsummiert und daraus die Gesamtflächenanteile ermittelt.

3.4.2 Ergebnisse

Die Veränderungen der prozentualen Oberflächenanteile von 1983 bis 1994 sind in den Abbildungen 2 und 3 dargestellt. In beiden Untersuchungsgebieten nahm der Anteil der nichtversiegelten Freiflächen ab während die versiegelten und bebauten Flächen an Bedeutung gewannen. Die genauen Zahlenwerte sind Tabelle 2 zu entnehmen.¹¹

¹¹ Bei der Berechnung der Veränderungen im Untersuchungsgebiet 2 wurden die 1983 nicht bearbeiteten Raster, für die keine Nacherhebung möglich war (siehe 3.2), nicht berücksichtigt. Der Vergleich stützt sich also nicht auf alle 1400 1 ha-Raster sondern lediglich auf 1340.

Abbildung 2: Veränderungen der prozentualen Oberflächenanteile 1983 - 1994 im Untersuchungsgebiet 1

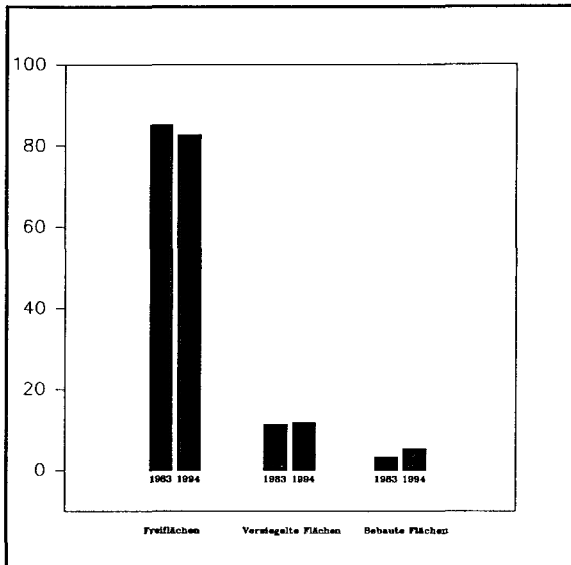


Abbildung 3: Veränderung der prozentualen Oberflächenanteile 1983 - 1994 im Untersuchungsgebiet 2

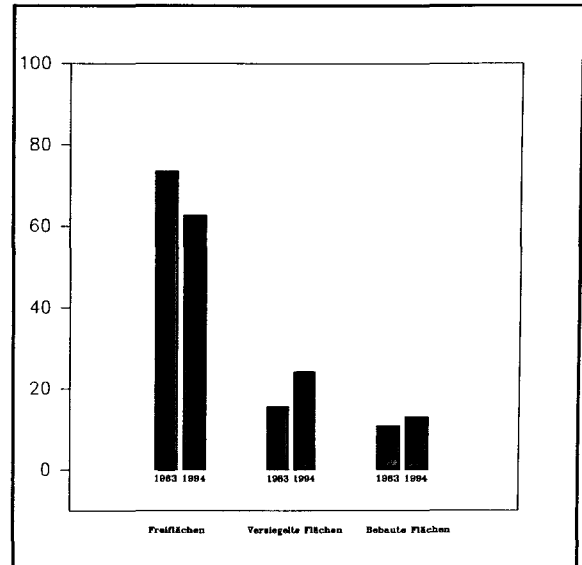
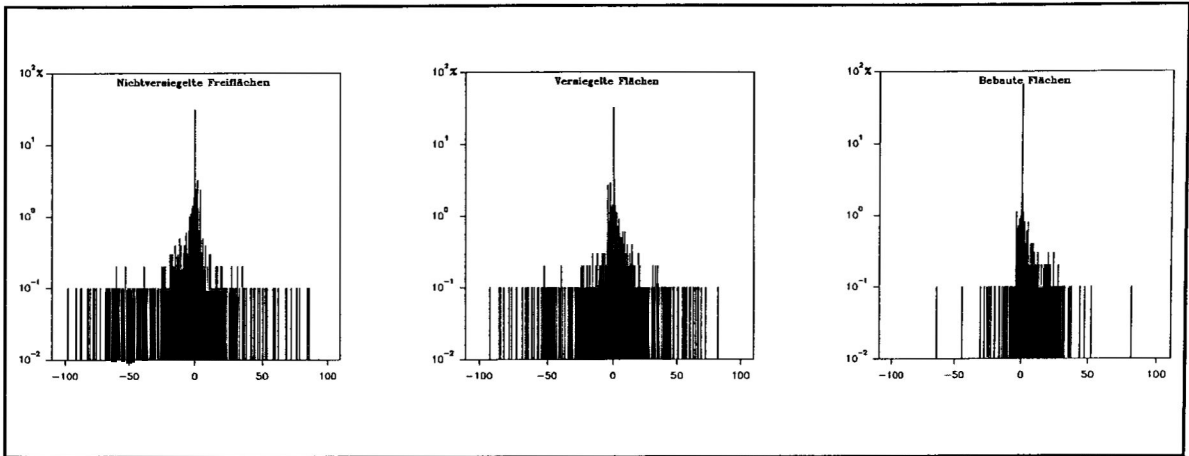
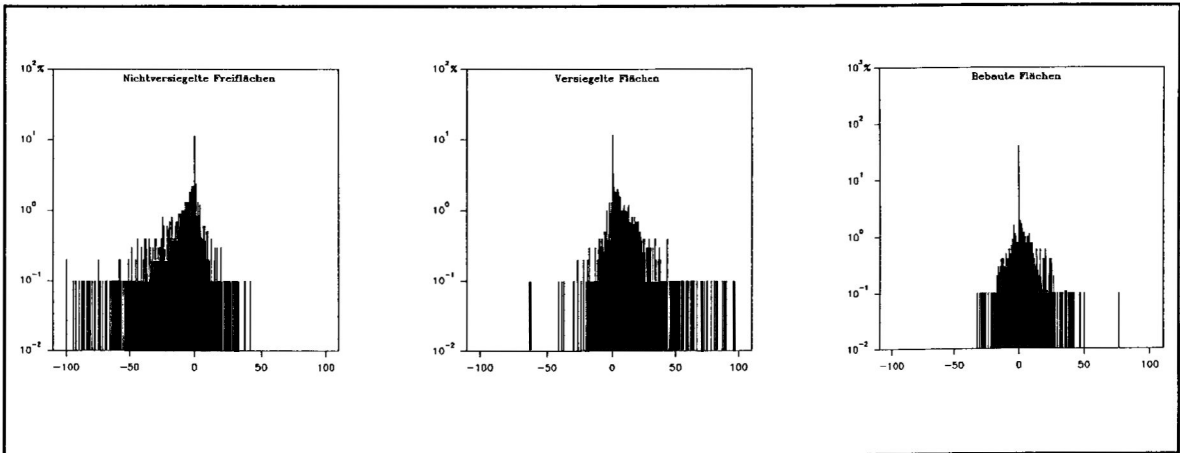


Tabelle 2: Oberflächenveränderungen 1983 - 1994

	Untersuchungsgebiet 1		Untersuchungsgebiet 2	
	1983	1994	1983	1994
Freifläche	85.2%	82.8%	73.5%	62.7%
Versiegelte Fläche	11.4%	11.8%	15.6%	24.2%
Bebaute Fläche	3.4%	5.4%	10.9%	13.1%

Vergleicht man die Werte mit den von SCHMITT (1990: 98) für 1983 für das gesamte Stadtgebiet ermittelten Zahlen - 77 % Nichtversiegelte Freiflächen, 9 % Versiegelte und 14 % Bebaute Flächen - so kann man das Untersuchungsgebiet 1 als überdurchschnittlich, das Gebiet 2 als unterdurchschnittlich durchgrünt bezeichnen.

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen die Histogramme der Oberflächenveränderungen. Der Modalwert aller Verteilungen ist der Wert Null (Null bedeutet keine Veränderung des Flächenanteils), sowohl im negativen wie im positiven Wertebereich nehmen die Häufigkeiten deutlich ab.

Abbildung 4: Histogramme der Oberflächenveränderungen im Untersuchungsgebiet 1**Abbildung 5:** Histogramme der Oberflächenveränderungen im Untersuchungsgebiet 2

Diese Verteilungscharakteristika waren ausschlaggebend für die, der kartographischen Darstellung zugrundeliegende, Klasseneinteilung.

Nach der Faustregel von STURGES ergaben sich acht bis neun zu unterscheidende Klassen, das entspricht auch in etwa der maximalen Anzahl der darstellbaren, gut zu unterscheidenden Rastersignaturen. Für die vorliegenden Verteilungen bot sich die Festlegung einer zentralen Klasse um Null und die Einteilung des nach oben und unten anschließenden Wertebereichs in Klassen mit additiv zunehmender Klassenbreite an (BARSCH et al. 1990: 179 ff.). Dadurch wird eine bessere Differenzierung der sehr

häufigen, "nahe bei Null" gelegenen, Werte erreicht, als dies bei Verwendung konstanter Klassenbreiten möglich ist.

Bedingt durch die unterschiedlichen Spannweiten der Datenkollektive sind die äußersten Klassen nicht in allen Fällen belegt, zugunsten einer einheitlichen kartographischen Darstellung wurde aber darauf verzichtet für diese Ausnahmen eine andere Klasseneinteilung zu treffen.

Die Karten 8 - 13 illustrieren die räumlich stark differenzierten Veränderungen der prozentualen Oberflächenanteile in den untersuchten Stadtteilen.

Bei der Auseinandersetzung mit den Karteninhalten sollten immer die möglichen Fehlerquellen mit berücksichtigt werden: Die zur Feststellung der Oberflächenanteile verwendete Methode des Schätzens der Flächenanteile birgt natürlich die Gefahr der Fehlschätzung¹² in sich, gleichfalls führt auch schon eine geringfügig falsche - oder von 1983 abweichende - Orientierung des zur Auszählung verwendeten Folienrasters zu falschen Werten. Schließlich können einzelne Fehler bei der Dateneingabe, angesichts der großen Datenmenge, ebenfalls nicht ausgeschlossen werden.

Im Untersuchungsgebiet 1 (Karten 8-10) sind massive Oberflächenveränderungen vor allem im Wohngebiet Heuchelhof - mit Schwerpunkten östlich der Berner Straße, sowie in den Bereichen Athener, Madrider, Prager und Wiener Ring, in den Ortsrandbereichen Rottenbauers sowie im dazwischengelegenen Gewerbegebiet festzustellen. In allen genannten Gebieten fand eine Ausdehnung der bebauten Flächen statt, die, mit Ausnahme von Madrider und Wiener Ring, mit einer Erhöhung des Anteils versiegelter Flächen und einer Reduzierung der nichtversiegelten Flächen einherging. Erstaunlich erscheint zunächst die Zunahme der nichtversiegelten Freiflächen, bei gleichzeitiger Anteilserhöhung der bebauten Areale und Reduzierung der versiegelten Flächen, in den Bereichen Madrider und Wiener Ring. Dieser Sachverhalt erklärt sich aus der Tatsache, daß sich diese Bereiche zum Zeitpunkt der Luftbildbefliegung 1983 gerade in der ersten

12 Um das Ausmaß dieser Fehlschätzung in etwa zu erfassen, bearbeitete ich eine größere Anzahl von 1 ha-Rastern mehrmals (sowohl für 1983 als auch für 1994); es kann festgestellt werden, daß Fehler oder besser differierende Schätzungen im Umfang von bis zu 2 % der jeweiligen Fläche wohl kaum zu vermeiden sind. Eine bessere Vergleichbarkeit verschiedener Flächenbilanzen (keine höhere Erfassungsgenauigkeit!) wäre eventuell durch die Verwendung von 10 m x 10 m-Rastern, für die jeweils nur der dominierende Flächentyp registriert wird, als kleinste Erfassungseinheit zu erreichen.

Bauphase befanden (SCHLIEPHAKE u. KITZ 1987) und folglich in die Flächenbilanz als vegetationslose sprich versiegelte Flächen eingingen. Die gleiche Erklärung gilt wohl auch für andere Gebiete mit ähnlichen Konstellationen oberflächenverändernder Dynamik (z. B. Randbereiche von Heidingsfeld im Nordosten des Untersuchungsgebietes). Auffällig sind die drei isolierten Bereiche westlich bzw. nordwestlich von Rottenbauer, die eine Freiflächenzunahme aufweisen. Für diese Bereiche ermittelte ich eine, zwar eher disperse, Wiesenoberfläche, während die Flächenbilanz 1983 hier versiegelte Flächen ausweist.

Die Karten 11 - 13 zeigen für das Untersuchungsgebiet 2 deutliche Abnahmen des Anteils natürlicher Flächen mit einem ausgeprägten Schwerpunkt im Bereich des, in den letzten Jahren stark gewerblicher Nutzung zugeführten, Wöllrieder Hofs im südöstlichen Quadranten des Kartenausschnitts, hier erfolgte eine starke Zunahme der bebauten, vor allem aber der versiegelten Flächen. Aber auch im übrigen Gebiet sind, teilweise ganz beträchtliche, Anteilsverschiebungen in Richtung der künstlichen Oberflächen zu verbuchen, die ihr größtes Ausmaß, wie auch im Untersuchungsgebiet 1, meist in den Randbereichen der bereits stark von Versiegelung und Bebauung geprägten Gebiete erreichen. Geländeklimatologisch bedeutsam ist die zusätzliche Bebauung von Kürnachtal und Lindleinsmühle die zur weiteren Blockierung dieser beiden, ohnehin schon weitgehend plombierten, potentiellen Frischluftleitbahnen beiträgt.

In beiden Gebieten sind für die nächsten Jahre weitere, flächenmäßig sehr beträchtliche, Bauvorhaben geplant, die eine weitere Reduzierung natürlicher Oberflächen zur Folge haben werden: Im Untersuchungsgebiet 1 soll, auf einer Fläche von 55 ha, das Wohngebiet Rottenbauer-Nord entstehen, womit beträchtliche Anteile der zwischen Rottenbauer und dem nördlich gelegenen Gewerbegebiet noch verbliebenen Freiflächen wegfallen werden. In noch größerem Ausmaß sind Ausweitungen der versiegelten und bebauten Bereiche im Untersuchungsgebiet 2 geplant. Neben der Errichtung eines Wohnbau- und Gewerbegebietes Würzburg Nord-Ost zwischen Versbach und Lengfeld (150 ha Baufläche), ist außerdem der Bau eines reinen Wohngebietes im Bereich Flürlein-Essigarten vorgesehen (STADT WÜRZBURG 1995).

4 Oberflächenspezifische Ausprägungen des thermischen und hygrischen Milieus

4.1 Physikalisch-klimatologische Grundlagen oberflächen-induzierter Klimadifferenzierungen

Wie bereits in 1.1 angesprochen, sind unterschiedliche Energiebilanzen verschiedener Oberflächen der Hauptgrund für die thermische Sonderstellung der Stadt (gehäuftes Auftreten künstlicher Oberflächen mit lufttemperaturerhöhenden Eigenschaften) und für innerstädtische Temperaturdifferenzierungen. Ähnliche Bedingtheiten sind auch für die Feuchtigkeitsverhältnisse in der bodennahen Luftschicht nachgewiesen, wobei hier die Zusammenhänge nicht so eindeutig nachzuweisen sind. Dementsprechend überwiegen in der Literatur auch die Hinweise zum thermischen Verhalten verschiedener Oberflächen, während bezüglich der hygrischen Situation meist nur vage Vergleiche zwischen Stadt und Umland gezogen werden.

Da diese Tatsachen eine substantielle theoretische Grundlage meiner Arbeit darstellen, möchte ich die Ursachen-Wirkungskomplexe, die zu den erwähnten klimatischen Differenzierungen führen, unter Berücksichtigung ihrer tageszeitlichen Variabilität näher erläutern. Dabei sollen zunächst generelle Unterschiede zwischen natürlichen und künstlichen Oberflächen erörtert werden, bevor auf besondere Charakteristika einzelner Oberflächenarten innerhalb dieser Oberflächenklassen eingegangen wird.

Die Energiebilanz einer Oberfläche kann durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$Q + B + L + V + (A) = 0$$

mit Q = Strahlungsbilanz
 B = Bodenwärmestrom
 L = Strom fühlbarer Wärme
 V = Strom latenter Wärme

A = Anthropogene Wärmezufuhr (im Siedlungsbereich)¹³

Je nachdem ob die Energieflüsse von der Grenzfläche Atmosphäre / Erdoberfläche weggerichtet sind oder zu ihr hinführen, erhalten die betreffenden Terme dabei negatives oder positives Vorzeichen.

Die Strahlungsbilanz Q setzt sich aus der kurzwelligen und der langwelligen Strahlung zusammen. Die der Erdoberfläche zugestrahlte kurzwellige Strahlung - die sich aus direkter solarer und diffuser Strahlung zusammensetzt - wird von verschiedenen Oberflächenmaterialien, in Abhängigkeit vom jeweiligen Reflexionsvermögen, zu einem unterschiedlich großen Anteil reflektiert. Zwischen den Albedowerten verschiedener Oberflächen sind zwar deutliche Unterschiede festzustellen (siehe Tabelle 3), eine diesbezüglich generelle Unterscheidung natürlicher und künstlicher Oberflächen läßt sich aber nicht ableiten. Nach dem erweiterten STEFAN-BOLTZMANNschen Gesetz¹⁴ hängt das Ausmaß der langwelligen Ausstrahlung einer Oberfläche von ihrem Emissionsvermögen und ihrer Temperatur ab, wobei letztere, neben dem Ausmaß der Einstrahlung, von Wärmekapazität und -leitfähigkeit des jeweiligen Materials bestimmt wird. Während das Emissionsvermögen verschiedener Oberflächen nur graduell verschieden ist, weisen typische städtische Materialien deutlich höhere Werte der Wärmekapazität und -leitfähigkeit auf (siehe Tabelle 3) und erreichen damit auch höhere Oberflächentemperaturen; folglich übertrifft die langwellige Ausstrahlung städtischer Flächen diejenige natürlicher Flächen. Für Stadtgebiete wird im allgemeinen eine, gegenüber dem Freiland, geringere kurzwellige Einstrahlung (Globalstrahlung) aufgrund des höheren Aerosolgehalts der Stadtatmosphäre veranschlagt. Dieses Strahlungsdefizit wird aber zum einen durch Mehrfachreflexion und damit stärkere Absorption aufgrund der

13 Die Einbeziehung anthropogener Wärmeemissionen in die Wärmehaushaltsgleichung städtischer Oberflächen ist durchaus gerechtfertigt, übertrifft A doch in einigen Städten bereits Q - z. B. Montreal, Manhattan; nach OKE (1987: 276), wobei natürlich erhebliche jahreszeitliche Unterschiede bestehen.

14 Das Gesetz von STEFAN-BOLTZMANN lautet: $S = a \cdot T^4$ mit S = Ausstrahlungsenergie, $a = 8,26 \cdot 10^{-11} \text{ cal}/(\text{cm}^2 \text{ min } ^\circ\text{K}^4)$, T = absolute Temperatur des Körpers. Dabei wird zugrundegelegt, daß es sich bei dem Strahler um einen schwarzen Körper handelt, der alle Wellenlängen vollständig absorbiert, durch die Einführung eines zusätzlichen Terms e (Emissionskoeffizient entspricht dem Absorptionskoeffizienten) ist die Gleichung auch für Materialien erfüllt, die diese Eigenschaft nicht besitzen (WEISCHET 1988: 84).

vertikalen Strukturierung des Baukörpers, zum anderen durch die gesteigerte langwellige Gegenstrahlung infolge stärkerer Strahlungsabsorption und -emission der verschmutzten Atmosphäre ausgeglichen. Bei der Betrachtung verschiedener Oberflächen innerhalb eines Stadtgebietes ist dieser letztgenannte Sachverhalt jedoch keine Grundlage lokalklimatischer Differenzierungen, da er in diesem räumlichen Bezugsrahmen für alle Oberflächen gleichermaßen zutrifft.

Tabelle 3: Klimatologisch relevante physikalische Eigenschaften verschiedener Oberflächen (nach GERTIS u. WOLFSEHER 1977; HELBIG 1987:9/10; WEISCHET 1988: 7)

Oberflächen	Volumenbezogene Wärmekapazität [J/m ³ K] 10 ⁻⁶	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Albedo α	Emissionskoeffizient ϵ ($\lambda = 4\text{-}100 \mu\text{m}$)
Asphalt	0.9 - 1.9	0.2 - 0.7	0.05 - 0.20	0.95
Beton	1.5 - 2.5	1.0 - 2.0	0.10 - 0.35	0.71 - 0.90
Ziegel	0.5 - 1.8	0.3 - 1.0	0.20 - 0.40	0.90 - 0.92
Naturstein	-	-	0.20 - 0.35	0.85 - 0.95
Holz	0.8 - 1.7	0.05 - 0.2	-	0.90
Dachziegel	-	-	0.10 - 0.18	0.90
Wellblech	-	-	0.10 - 0.16	0.13 - 0.28
Glas	-	-	0.08	0.87 - 0.94
Luft	1.25×10^{-3}	0.02	-	-
Wasser	4.2	0.58	0.03 - 0.10	0.97
Sandboden	1.1 - 3.2	0.2 - 2.6	0.25 - 0.45	0.91
Lehmboden	1.0 - 3.0	0.2 - 1.7	-	-
Humus	2.4 - 4.0	0.2 - 1.5	-	-
Moorboden	0.5 - 3.9	0.06 - 0.5	-	-
Getreidefeld	-	-	0.10 - 0.25	-
Wiese	-	-	0.15 - 0.25	0.97 - 0.98
Laubwald	-	-	0.15 - 0.20	0.90
Nadelwald	-	-	0.10 - 0.15	0.90
Neuschnee	-	-	0.75 - 0.90	0.98

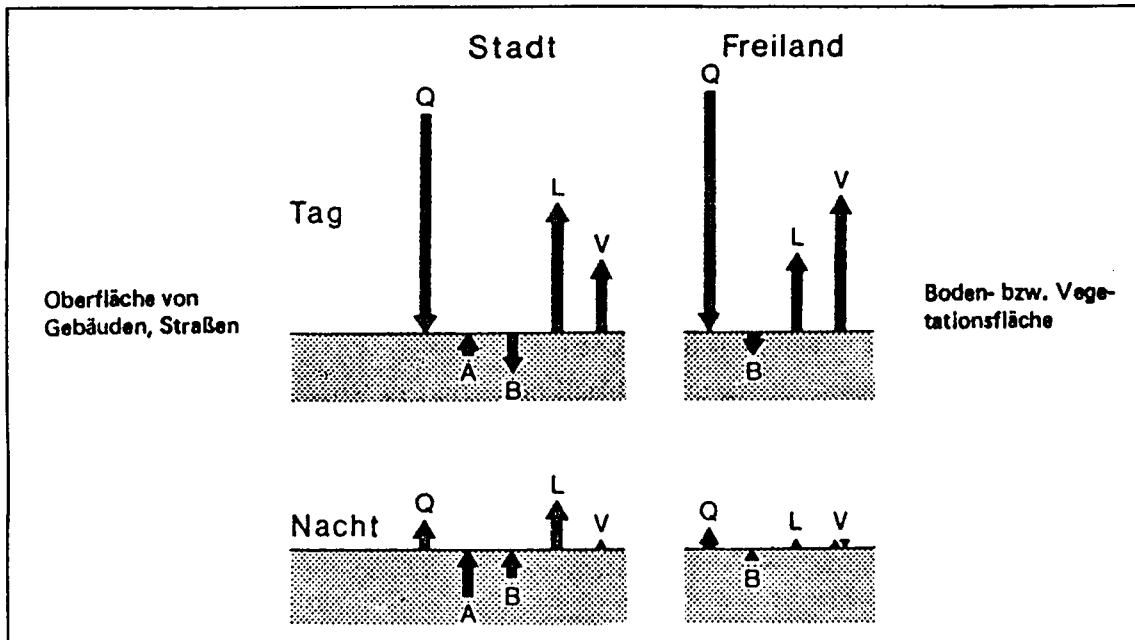
In bedeutend stärkerem Maße tragen Modifikationen der anderen Energiebilanzterme zu oberflächentypischem thermischen Verhalten bei.

Die aus positiver Strahlungsbilanz resultierenden Energieüberschüsse werden zum einen für die Verdunstung von Wasser (Strom latenter Wärme) und für konvektiven Wärmetransport verbraucht, zum anderen in den Boden abgeführt (Bodenwärmestrom).

Der Verdunstungswärmestrom V nimmt über künstlichen Oberflächen deutlich ab. Über Betondecken gelangen beispielsweise nur bis zu 10 % des Niederschlagswassers zur Verdunstung (KUTTLER 1985). Als Gründe hierfür sind das Fehlen biogener Wasserdampfproduktion und die weitgehende Ableitung von Niederschlagswasser in die Kanalisation zu nennen - dies sind auch die Ursachen für die niedrigere Luftfeuchtigkeit über diesen Oberflächen - wogegen anthropogene Wasserdampffreisetzung eine Verstärkung von V bewirkt. Eine Umkehrung des Vorzeichens von V - das heißt Kondensation - und damit Wärmeabgabe von der Atmosphäre an die unterlagernde Fläche, wie dies bei nichtversiegelten Flächen nachts festgestellt werden kann, findet bei städtischen Oberflächen in der Regel nicht statt. Demgegenüber führen die Wärmeleitungs- und -speichereigenschaften der stadttypischen Oberflächen zu gesteigerter Energieübertragung in den und Wärmespeicherung im Boden, aber auch zur Ausgleichung von Strahlungsverlusten durch Wärmeübertragung zurück an die Oberfläche (MIESS 1988). Ebenso wird der Strom fühlbarer Wärme, gegenüber natürlichen Oberflächen, deutlich verstärkt.

Abbildung 6 faßt die Unterschiede der Energiebilanzen städtischer und nichtstädtischer Oberflächen zusammen.

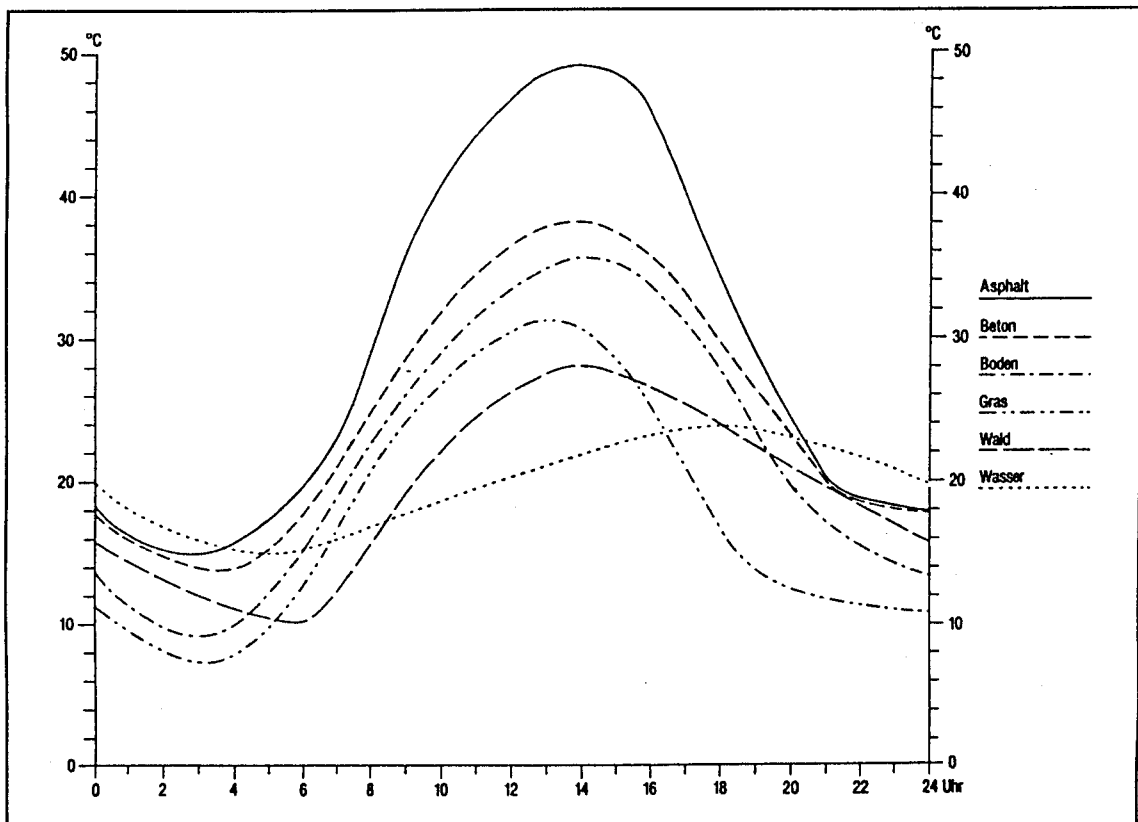
Abbildung 6: Stadt - Freiland Unterschiede der Energiebilanz
(aus NÜBLER 1979: 17)



Aus unterschiedlichen Energiebilanzen resultieren oberflächentypische Oberflächen- und Lufttemperaturen, die für einige Oberflächen in ihrer tageszeitlichen Variabilität in den Abbildungen 7 bzw. 8 und 9 - Abbildung 9 enthält auch Werte des Dampfdrucks - dargestellt sind. In Tabelle 4 sind einige, von KATZSCHNER (1986) in Kassel ermittelte Temperatur- und Feuchtigkeitswerte zusammengefaßt. Einen stark generalisierten Überblick über den tageszeitlichen Verlauf der Temperaturen verschiedener Oberflächen vermittelt Abbildung 10.

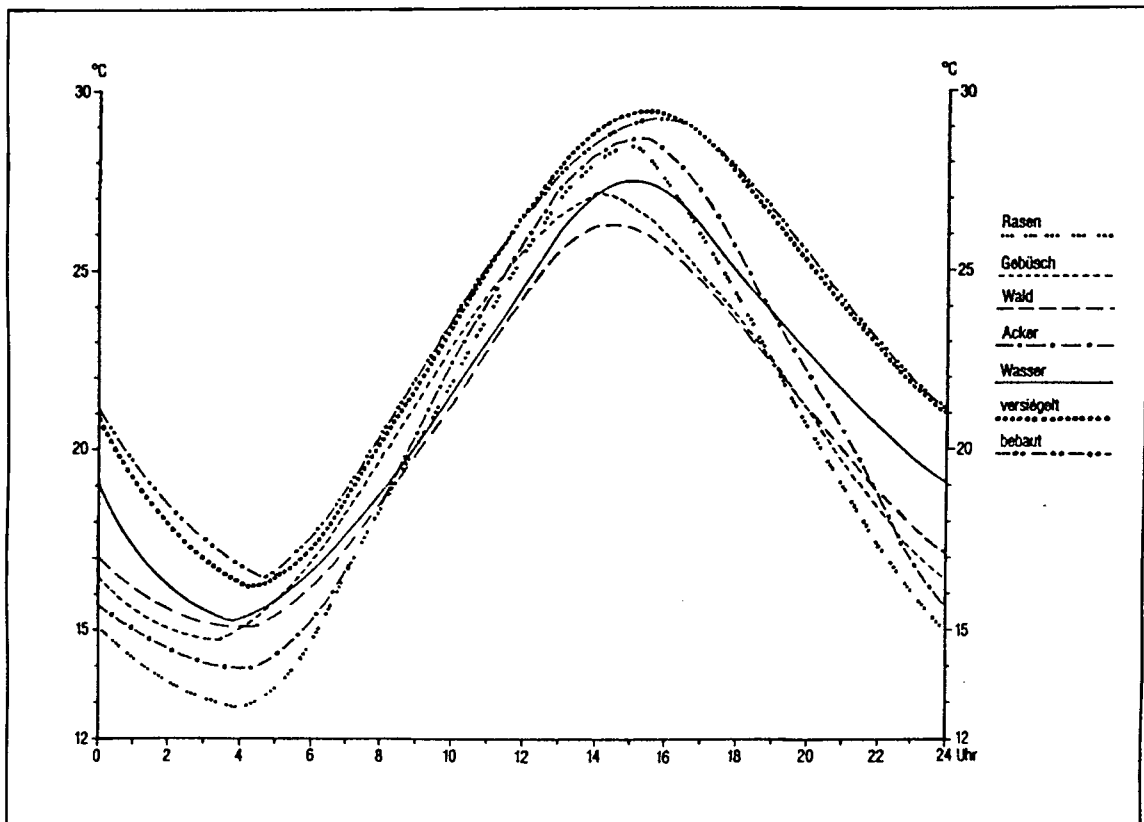
Bei Vergleich der Abbildungen 7 und 8 wird deutlich, daß sowohl die absoluten Temperaturen als auch die Temperaturunterschiede an der Oberfläche bedeutend höhere Werte erreichen, als in 2 m Höhe über Grund. Dies ist auf Temperatenausgleich infolge vertikalen Aufstiegs der erwärmten Luft und horizontaler Luftbewegungen zurückzuführen (MAHLER u. STOCK 1977).

Abbildung 7: Tagesgang der Oberflächentemperaturen verschiedener Materialien
(aus HASE 1990: 54; nach DITTMANN 1982: 72)



Vor allem während der nächtlichen Ausstrahlungsphase liegen die Temperaturen über den versiegelten und bebauten Flächen deutlich über denen der nichtversiegelten Freiflächen. Besonders auf Flächen mit hoher Bebauung können tagsüber, bedingt durch Abschattungseffekte, allerdings auch niedrigere Temperaturen als über natürlichen Oberflächen festgestellt werden. Dieselbe Ursache - die Horizont einschränkung im bebauten Bereich - führt nachts zu verminderter Ausstrahlung und damit zu relativ höheren Temperaturen (WEISCHET 1979: 419).

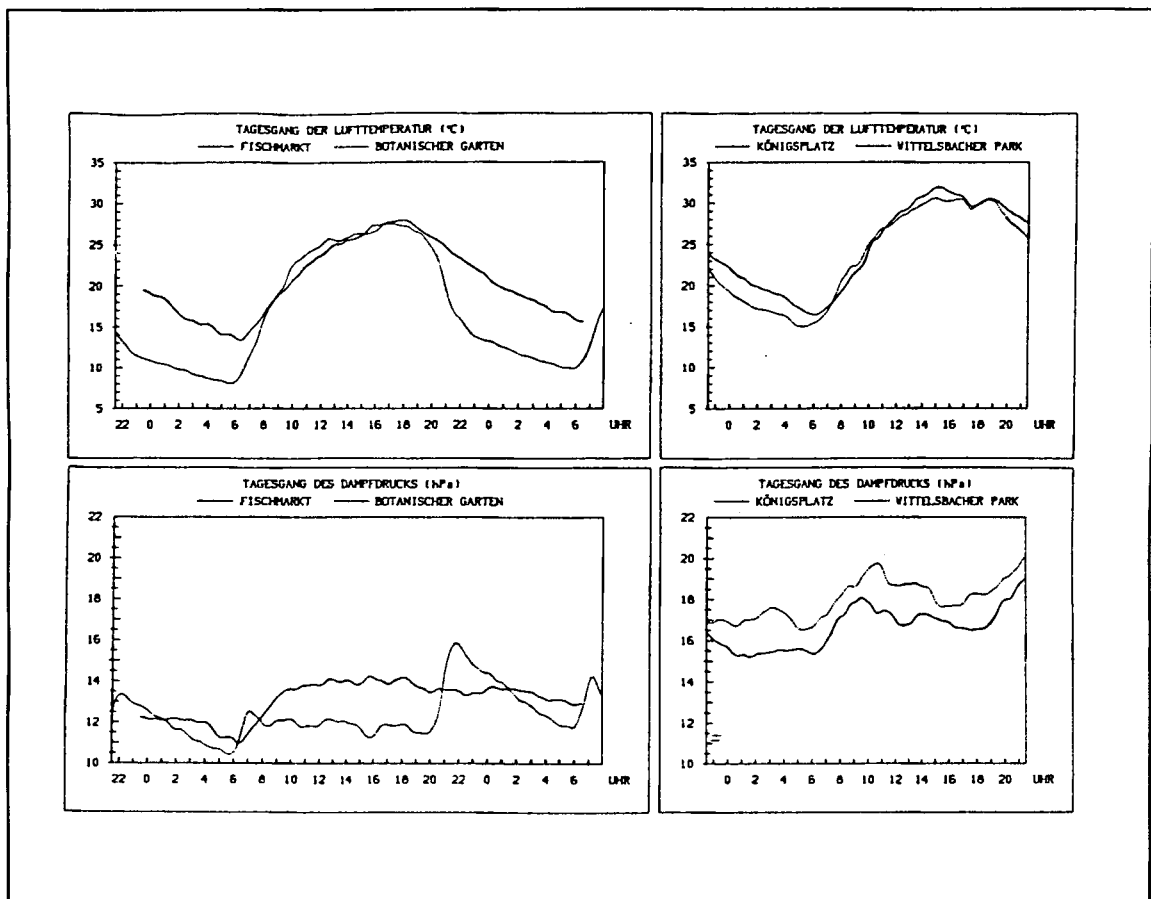
Abbildung 8: Tagesgang der Lufttemperatur in 2 m Höhe über verschiedenen Oberflächen
(aus HASE 1990: 54)



Auch innerhalb der Klasse der natürlichen Oberflächen sind wesentliche Unterschiede zu registrieren: Während Wiesen- und Ackerflächen bei Sonneneinstrahlung sehr hohe Lufttemperaturen aufweisen, wobei das Niveau der versiegelten und bebauten Flächen allerdings nicht ganz erreicht wird, bedingen sie nachts die tiefsten Temperaturwerte. Gebüsch- und insbesondere Waldformationen besitzen dagegen klimamildernde Wirkung (ROBEL 1975), das heißt in der Nacht sind die Temperaturen höher, am Tag niedriger als über niedrigeren Vegetationsbeständen. Die Hauptenergieumsatzfläche vertikal strukturierter Pflanzendecken liegt im Bereich des Kronenraumes, im darunterliegenden

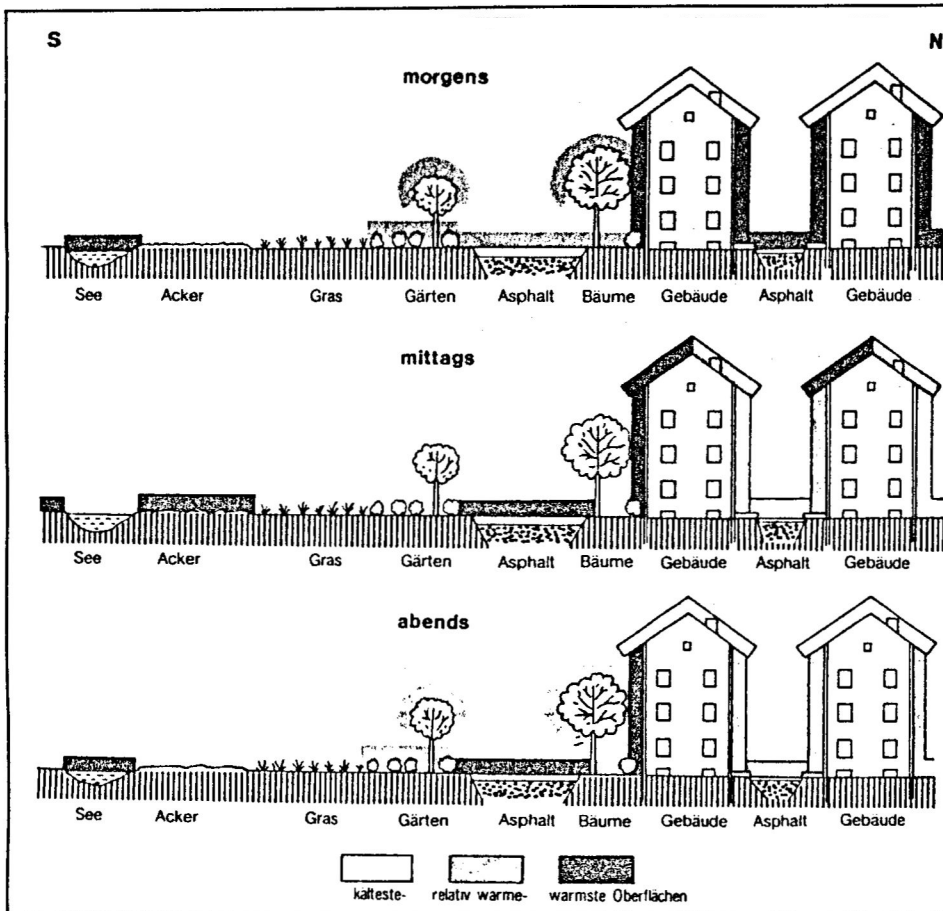
Stammraum erfährt die bodennahe Luftschicht tagsüber geringere Erwärmung - wozu auch Transpirationskühlung beiträgt - nachts aber auch nicht so starke Abkühlung, da langwellige Ausstrahlungsverluste durch Reflexion an den Blattflächen gemindert werden.

Abbildung 9: Tagesgänge von Lufttemperatur und Dampfdruck über verschiedenen Oberflächen
(aus JACOBET 1990: 20/21)



Erwähnenswert ist der Einfluß der phänologischen Entwicklung auf das thermische Verhalten von Pflanzenbeständen. Laubwälder beispielsweise nähern sich nach Laubfall in ihrem thermischen Verhalten stark den Wiesenflächen an (ROBEL 1975), aber auch für Ackerflächen wurden, an phänologische Phasen gebundene Temperaturschwankungen nachgewiesen (PESCHKE et al. 1992). Nach Aberntung einer Ackerfläche bewirkt der

Abbildung 10: Tageszeitlicher Verlauf von Oberflächentemperaturen
(aus ADAM 1988: 54)



Wegfall der pflanzlichen Transpiration eine beträchtliche Verstärkung des Transports fühlbarer Wärme in die auflagernde Luftschicht und damit eine höhere Lufttemperatur. Eine ähnlich klimamildernde Wirkung wie Waldbestände üben auch Wasseroberflächen aus. Infolge der hohen Wärmeleitfähigkeit und -kapazität sowie der hohen spezifischen Wärme des Wassers werden im Verein mit turbulenter Durchmischung tagsüber große Energiemengen in den Wasserkörper abgeleitet, die nachts, in Form von Wärmeenergie, wieder an die Luft abgegeben werden können.

Der Tagesgang des Dampfdrucks weist im Gegensatz zur Lufttemperatur, mit ihrem mittäglichen Maximum, typischerweise ein Maximum am frühen Vormittag und ein zweites in den frühen Abendstunden auf (Abbildung 9). Nach Sonnenaufgang führen gesteigerte Transpiration und die, durch die Temperaturzunahme, verstärkte Oberflächenverdunstung zu einem deutlichen Dampfdruckanstieg. Die durch zunehmende Erwärmung

im Laufe des Vormittags einsetzende turbulente Durchmischung mit trockeneren Luftmassen aus höheren Luftschichten, senkt die Dampfdruckwerte dann auf ein niedrigeres Niveau, das erst wieder gegen Abend, mit beginnender Abkühlung und damit verbundenem reduzierten Vertikalaustausch bei fortgesetzter Transpiration, ansteigt (OKE 1987: 66).

Tabelle 4: Lufttemperatur und Relative Luftfeuchtigkeit über verschiedenen Oberflächen (nach KATZSCHNER 1986: 4)

Meßstandort	12.00 Uhr		20.00 Uhr	
	T (°C)	RH (%)	T (°C)	RH (%)
Öffentliche Gebäude				
Asphalt (Parkplatz)	32.4	31	28.6	45
Bauschutt (Parkplatz)	32.2	32	26.9	50
Beifußgestrüpp	32.2	44	23.8	67
Asphalt / Hangvegetation	33.0	35	26.2	52
Pflastersteine	33.4	26	28.1	44
Betonplatten	33.2	21	28.7	42
Mischnutzung aus Kleingewerbe / Wohnen				
Hecke	32.6	28	28.8	43
Betonplatten	33.6	25	29.6	39
Asphalt (Hinterhof)	34.5	21	29.5	40
Wiese (Hinterhof)	30.7	27	26.3	52
Asphalt im Wohnbereich	34.1	18	28.4	42
Öffentliche Anlage				
Wiese am Fuldaufer	31.1	38	26.8	53
Pflastersteine	30.8	32	28.5	44
Wiese mit Bäumen	32.0	38	25.7	61
Wald am Fuldahang	29.1	40	25.5	57
Platten / Asphalt	31.4	21	27.2	47
kurzer Rasen	31.9	26	25.0	59

Im allgemeinen weisen vegetationsbestandene Flächen, aufgrund von Transpiration und Verdunstung von oberflächennahem Bodenwasser, höhere Dampfdruckwerte auf als versiegelte und bebaute Flächen. Abbildung 9 (Königsplatz - versiegelte Fläche; Wittelsbacher Park - innerstädtischer Park; Fischmarkt - dichtbebaute Innenstadt; Botanischer Garten - offene Grasfläche) illustriert einen Fall in dem aber das Gegenteil zutrifft; hier weist die bebaute Fläche (Fischmarkt) während der längsten Zeit des Tages höhere Dampfdruckwerte auf als die nichtversiegelte Freifläche (Botanischer Garten). Anthropogene Wasserdampfemissionen und verminderte vertikale Durchmischung in dicht bebauten Stadtbereichen bieten sich als plausible Erklärungen für derlei Phänomene an (JACOBET 1990).

Es sei betont, daß die oben beschriebenen oberflächenstrukturbedingten lokalklimatischen Differenzierungen ihre stärkste Ausprägung natürlich zu Zeiten maximaler Energieumsetzung bei vernachlässigbarer Advektion erfahren, das heißt also vor allem bei windschwachen, bewölkungs- und austauscharmen Hochdruckwetterlagen. Die Ergebnisse der im folgenden Abschnitt beschriebenen Messungen und folglich auch die spätere Extrapolation dieser Daten in die Fläche, sind dementsprechend nur für ebensolche Witterungssituationen repräsentativ.

4.2 Temperatur- und Feuchtigkeitsmessungen im Sommer 1995

Zur Bereitstellung der, für die weiteren Arbeitsschritte notwendigen Klimadaten, führte ich im Sommer 1995 zwei Meßkampagnen durch, die Aufschluß über die thermischen und hygri-schen Verhältnisse über den in der Flächenbilanz differenzierten Oberflächen liefern sollten.¹⁵

4.2.1 Meßfahrten

Wie in 4.1 bereits ausgeführt, sind oberflächeninduzierte klimatische Differenzierungen am deutlichsten bei autochthonen Strahlungswetterlagen ausgebildet; aus diesem Grunde

¹⁵ An dieser Stelle möchte ich mich bei meinen hochgeschätzten Kommilitoninnen Ulrike BEYER und Katrin STURM sowie den Herren Claus GRÜNWALD und Christian WEH herzlich für die logistische und personelle Unterstützung bei den Meßfahrten bedanken.

fanden die Messungen an Tagen mit ebensolchen Witterungsbedingungen statt. Zu beiden Terminen (30.06. und 21.07.1995) stand Mitteleuropa unter mehrere Tage währendem Hochdruckeinfluß, als dessen Folge in Würzburg zu den Zeitpunkten der Messungen weder Bewölkung, noch wesentliche advektive Luftbewegung festzustellen war.

Die Messungen wurden jeweils zu drei Tageszeiten durchgeführt: Morgens vor Sonnenaufgang, zum Zeitpunkt des Temperaturmaximums am frühen Nachmittag - zu diesen Zeiten ist der zeitliche Temperaturgradient relativ gering - sowie in den frühen Nachtstunden (nach Sonnenuntergang), da sich hier die maximalen Temperaturdifferenzen über verschiedenen Oberflächen ausbilden¹⁶.

Um dem Streben nach quasi-synchroner Datengewinnung zu entsprechen wurden außerdem die Meßrouten so gewählt, daß innerhalb eines Zeitraums von etwa einer Stunde alle Meßpunkte angefahren werden konnten, wobei am ersten Meßstandort zum Abschluß ein zweites Mal Temperatur- und Feuchtemessungen stattfanden, um Referenzdaten zur Korrektur des thermischen und hygrischen Tagesgangs zu gewinnen.

Im Verlauf der Meßfahrten wurden, um die Gefahr von Zufallsmessungen zu minimieren, für jede Oberflächenart mindestens drei repräsentative Punkte angefahren.¹⁷ Die Messung von Temperatur und Relativer Luftfeuchtigkeit in etwa 2 m Höhe erfolgte dabei mit einem digitalen Aspirationspsychrometer (Thies Hygrophil - 4456), wobei der jeweils zu messende Wert, nachdem keine Schwankungen mehr auftraten, abgelesen und in einem Meßprotokoll notiert wurde.

Die Auswahl der Meßpunkte erfolgte für die beiden Termine nach unterschiedlichen Kriterien:

Die Meßfahrt am 30.06.1995 beinhaltete Meßpunkte auf möglichst homogen gestalteten Oberflächen, um dadurch sozusagen idealtypische Temperatur- und Feuchtigkeitswerte zu

16 Gemeinhin wird zu diesem Zeitpunkt mit besonders starker zeitlicher Änderung der Temperatur gerechnet, die sich aufgrund ihres annähernd linearen Verlaufs aber recht zuverlässig korrigieren läßt (NÜBLER 1979: 35), ein solchermaßen, gegenüber den anderen Meßterminen akzentuierter Temperaturgradient ließ sich bei den von mir durchgeführten Messungen jedoch nicht feststellen.

17 Bei den Messungen am 30.06.1995 wurde nur über einer Wasseroberfläche gemessen; der Grund dafür liegt in der sehr spärlichen Verbreitung von Wasserflächen entlang der Meßroute, die aber für alle anderen Oberflächen sehr gute Meßstandorte aufwies. Um den zeitlichen Rahmen der Meßfahrt nicht zu sehr auszudehnen, wurde auch darauf verzichtet diese Wasserfläche mehrmals anzufahren.

erhalten, die im folgenden für die Abschätzung der klimatischen Veränderungen herangezogen werden.

Mit dem zweiten Block von Messungen wurde ein anderes Ziel verfolgt. Um in etwa abschätzen zu können inwieweit das thermische und hygrische Milieu über einer spezifischen Oberfläche in Abhängigkeit von horizontaler Erstreckung und Umgebung variiert, wählte ich ganz bewußt für jede Oberflächenart unterschiedlich ausgebildete Flächen aus; so führte ich beispielsweise Messungen auf einer relativ großen, homogenen Wiesenfläche aber auch auf einem in der Innenstadt inmitten bebauter und versiegelter Flächen gelegenen Wiesenstück durch. Diese Meßergebnisse dienen als Grundlage der in Abschnitt 6 vorgestellten Arbeiten.

Die Meßrouten mit der Lage der Meßpunkte sind in den Karten 14 und 15 dargestellt, in den Tabellen 5 und 6 (im Anhang) sind die unkorrigierten Meßwerte aufgelistet.

4.2.2 Korrektur und Aufbereitung der Meßdaten

Ein sinnvoller Vergleich der Meßwerte ist nur möglich wenn sie für einen einheitlichen Zeitpunkt vorliegen, da dies nach den Messungen nicht der Fall ist müssen nun Korrekturen folgen, die alle Daten auf ein zeitliches Bezugsniveau transformieren.

Als Bezugszeitpunkt dient, je nach Tageszeit und Richtung der Temperaturentwicklung während der Messung, die erste oder die abschließende Messung am Referenzpunkt - mittags und abends die "wärmere", morgens die "kühlere".

Die Angleichung jedes gemessenen Wertes an den Bezugstermin erfolgt durch die Verknüpfung zweier Korrekturfaktoren, von denen der erste den postulierten linearen Trend der Temperaturentwicklung¹⁸ im Verlauf der Messungen ausgleicht, während der zweite diesen ersten Term durch die Einbeziehung des oberflächenspezifischen thermischen Tagesgangs modifiziert.

¹⁸ Die Annahme einer linearen Temperaturänderung entspricht natürlich nicht ganz den realen Gegebenheiten, je nach oberflächentypischem thermischem Verhalten unterliegt der Zusammenhang Zeit / Temperatur anderen funktionalen Beziehungen (NÜBLER 1979: 37). Dieser Tatsache wird mit Einführung des zweiten Korrekturfaktors Rechnung getragen.

Das erste Korrekturglied LT ergibt sich aus der Gleichung:

$$LT = D \cdot \frac{|ZP - ZB|}{|ZD|}$$

wobei

D = Temperaturdifferenz zwischen erster und zweiter Messung am Bezugspunkt

$|ZD|$ = zeitliche Differenz zwischen erster und zweiter Messung am Bezugspunkt

$|ZP - ZB|$ = zeitliche Differenz zwischen jeweiligem Meßpunkt und Bezugspunkt.

Der oberflächenspezifische Korrekturfaktor KO läßt sich ermitteln aus:

$$KO = \frac{|TBO - TAO|}{|TBB - TB|}$$

mit

TBO = Temperatur am Meßpunkt im benachbarten Meßzeitraum

TAO = Temperatur am Meßpunkt zum aktuellen Zeitpunkt

TBB = Temperatur am Bezugspunkt im benachbarten Zeitraum

TB = Temperatur am Bezugspunkt zum betrachteten Termin.

Als benachbarter Termin wird dabei, je nach Temperaturzu- oder -abnahme im Verlauf der Meßfahrt, der im Tagesgang vorangehende bzw. nachfolgende Meßzeitraum herangezogen.

Der endgültig an den Referenzzeitpunkt angeglichenen Temperaturwert TK wird mit

$$TK = TAO \pm LT \cdot KO$$

berechnet.

Auf eine Einbeziehung des vertikalen Temperaturgradienten in die Datenkorrektur konnte bei Meßfahrt 1 angesichts von maximal 10 m Vertikaldistanz zwischen den Meßpunkten verzichtet werden, die Messungen des zweiten Termins wurden unter Annahme eines vertikalen Temperaturgradienten von $-0,3 \text{ }^{\circ}\text{C} / 100 \text{ m}$ auf 200 m NN (Höhe ü. NN des ersten Meßpunktes) korrigiert.¹⁹

Für die Darstellung der Feuchtigkeitsverhältnisse wird im folgenden nicht die, stark an die Lufttemperatur gekoppelte, Relative Luftfeuchtigkeit, sondern der Wasserdampfpartialdruck verwendet, der ein realistischeres Maß für den Wasserdampfgehalt der Atmosphäre darstellt (BRÜNDL et al. 1986: 149). Der nicht gemessene Dampfdruck (VP) kann aus den vorhandenen korrigierten Daten folgendermaßen berechnet werden:

$$VP[hPa] = \frac{RH \cdot E}{100}$$

mit: RH = Relative Luftfeuchtigkeit in %

E = Sättigungsdampfdruck in hPa

Dabei gilt für den temperaturabhängigen Sättigungsdampfdruck E die funktionale Beziehung:

$$E[hPa] = 6.1078 \cdot e^{\frac{17.08085 \cdot t}{234.175 + t}}$$

4.2.3 Ergebnisse

In den Tabellen 7 und 8 sind die korrigierten Ergebnisse der Meßfahrten sowie die für die acht bzw. drei in den Flächenbilanzen differenzierten Oberflächen gemittelten Temperatur- und Feuchtigkeitswerte aufgeführt. Die oberflächenspezifischen Mittelwerte sind zusätzlich zur Verdeutlichung in Diagrammform in den Abbildungen 11 - 18 dargestellt. Die für drei

¹⁹ In der freien Atmosphäre beträgt die Temperaturabnahme mit der Höhe etwa $0,5 \text{ }^{\circ}\text{C pro } 100 \text{ m}$ (WEISCHET 1988: 106), unter dem Einfluß der Erdoberfläche ist allerdings ein Wert von $0,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ realistischer (mdl. Mitteilung Prof. JACOBET).

Oberflächen gemittelten Werte sind dabei nur für die in Abschnitt 5 verwendeten Meßwerte graphisch umgesetzt.

Tabelle 7: Korrigierte Klima-Meßdaten vom 30.06.1995

Meßfahrten zur Erfassung von Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit in 2 m Höhe am 30.06.1995										
Meßpunkt Nr.	Oberfläche	Morgens			Mittags			Nachts		
		T (°C)	RH (%)	VP (hPa)	T (°C)	RH (%)	VP (hPa)	T (°C)	RH (%)	VP (hPa)
1	1	14.2	84.9	13.8	29.5	27.7	11.4	23.9	47.0	14.0
2	6	15.8	77.7	14.0	31.2	24.1	11.0	25.0	41.6	13.2
3	8	16.1	78.6	14.4	30.2	24.4	10.5	24.6	41.1	12.7
4	8	15.7	76.0	13.6	29.3	29.3	12.0	24.8	43.2	13.5
5	3	14.1	80.7	13.0	30.1	25.9	11.1	22.7	50.3	13.9
6	8	14.7	77.2	12.9	30.9	24.9	11.1	24.0	50.1	15.0
7	4	13.0	92.8	13.9	29.8	35.5	14.9	22.0	66.5	17.6
8	7	13.6	82.2	12.8	31.3	26.8	12.3	23.3	54.0	15.5
9	3	12.8	86.3	12.8	28.8	37.6	14.9	22.0	58.5	15.5
10	3	13.0	84.8	12.7	29.0	29.1	11.7	21.3	64.4	16.4
11	2	11.7	91.1	12.5	30.3	29.1	12.6	19.4	73.4	16.6
12	5	12.5	87.7	12.8	31.9	25.4	12.0	21.2	63.0	15.9
13	5	12.3	90.4	13.0	31.1	24.9	11.3	20.4	64.5	15.5
14	2	12.3	91.2	13.1	29.5	30.7	12.7	19.7	68.2	15.6
15	7	14.6	77.2	12.9	31.0	25.5	11.5	23.2	54.2	15.4
16	6	14.6	79.9	13.3	32.1	24.8	11.9	24.0	47.5	14.2
17	6	14.3	82.0	13.4	31.3	24.6	11.2	23.8	48.0	14.2
18	5	13.9	89.2	14.2	30.6	32.0	14.1	23.1	45.3	12.8
19	1	12.9	89.2	13.3	30.2	27.3	11.7	22.8	48.6	13.5
20	7	15.3	80.2	14.0	31.0	26.3	11.8	25.1	37.7	12.0
21	1	13.5	87.6	13.6	30.0	28.7	12.2	24.3	33.6	10.2
22	2	12.2	91.7	13.1	30.1	33.7	14.4	22.3	41.5	11.2
1	1	13.6	87.2	13.6	29.8	27.0	11.3	24.1	39.9	12.0

Oberflächenspezifische Mittelwerte (für 8 Oberflächen)									
1 (Wiese)	13.6	87.2	13.6	29.9	27.7	11.7	23.8	42.3	12.4
2 (Gebüsch)	12.1	91.3	12.9	30.0	31.2	13.3	20.5	61.0	14.5
3 (Wald)	13.3	84.0	12.8	29.3	30.9	12.6	22.0	57.8	15.3
4 (Wasser)	13.0	92.8	13.9	29.8	35.5	14.9	22.0	66.5	17.6
5 (Acker)	12.9	89.1	13.3	31.2	27.4	12.4	21.6	57.6	14.7
6 (Versiegelte Fläche)	14.9	79.9	13.5	31.5	24.5	11.4	24.3	45.7	13.9
7 (Niedrige Bebauung)	14.5	79.9	13.2	31.1	26.2	11.9	23.8	48.6	14.3
8 (Hohe Bebauung)	15.5	77.3	13.6	30.1	26.2	11.2	24.5	44.8	13.8
Oberflächenspezifische Mittelwerte (für 3 Oberflächen)									
Nichtversiegelte Freifläche	13.0	88.9	13.3	30.0	30.5	13.0	22.0	57.0	14.9
Versiegelte Fläche	14.9	79.9	13.5	31.5	24.5	11.4	24.3	45.7	13.9
Bebaute Fläche	15.0	78.6	13.4	30.6	26.2	11.5	24.2	46.7	14.0

Tabelle 8: Korrigierte Klima-Meßdaten vom 21.07.1995

Meßfahrten zur Erfassung von Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit in 2 m Höhe am 21.07.1995										
Meßpunkt Nr.	Oberfläche	Morgens			Mittags			Nachts		
		T (°C)	RH (%)	VP (hPa)	T (°C)	RH (%)	VP (hPa)	T (°C)	RH (%)	VP (hPa)
1	8	17.8	88.2	17.1	29.1	60.0	24.1	27.6	60.6	21.4
2	8	19.8	79.4	17.4	32.8	49.4	23.3	30.2	49.8	20.8
3	4	17.0	92.3	17.9	29.7	65.9	26.1	25.2	82.0	26.0
4	8	19.3	82.2	18.0	33.2	48.5	24.2	30.1	50.5	21.2
5	6	18.9	81.5	16.7	35.2	43.4	24.2	29.2	52.4	20.9
6	6	18.4	84.3	17.4	32.4	47.2	22.4	29.3	51.8	20.5
7	4	18.8	85.3	17.6	31.8	47.3	21.1	29.3	53.7	21.3
8	5	17.3	89.9	17.3	33.7	47.6	23.7	26.7	65.2	21.9
9	7	16.7	90.7	16.4	32.8	48.7	22.9	26.6	68.6	22.9
10	4	18.5	86.5	17.8	32.1	46.9	21.9	27.8	61.4	21.8
11	5	15.0	95.9	16.2	33.8	47.0	23.7	25.2	75.4	23.8
12	5	15.0	94.8	16.1	33.6	46.7	23.2	24.1	77.2	23.0

13	3	17.7	90.1	17.5	32.2	47.8	22.4	27.2	62.1	22.1
14	7	16.7	87.7	15.8	32.8	46.4	21.9	26.8	66.2	22.2
15	1	17.8	91.1	17.7	33.8	45.3	22.7	27.8	62.2	22.1
16	7	16.8	87.0	15.8	32.4	46.1	21.9	27.5	62.6	22.1
17	2	18.0	90.3	18.6	33.9	48.3	24.2	27.9	60.5	21.4
18	1	16.4	92.7	16.8	32.0	47.3	22.4	24.3	81.5	24.2
19	3	18.2	89.2	18.4	32.1	45.4	21.4	27.2	60.2	21.4
20	2	14.9	96.6	15.4	31.4	59.6	26.5	23.5	85.1	23.9
21	2	15.3	95.3	16.2	33.0	51.8	25.7	24.1	83.3	24.8
22	2	18.7	90.1	18.6	32.9	48.3	22.9	27.6	63.4	22.5
23	1	15.4	96.0	16.4	31.7	46.5	20.7	24.9	75.5	22.4
24	3	16.3	93.3	16.9	31.5	47.6	21.1	25.4	76.0	24.1
25	1	18.4	87.5	18.0	32.8	40.8	19.0	28.0	58.4	22.0
26	6	19.2	84.8	18.5	33.1	39.0	19.6	28.5	55.9	20.8
27	3	15.8	94.0	16.1	31.0	46.5	20.7	25.1	77.9	24.4
28	8	19.8	81.5	17.8	34.0	37.6	19.7	28.9	54.3	20.4
1	8	17.7	88.2	17.1	29.4	47.2	18.9	26.8	61.2	20.5
Oberflächenspezifische Mittelwerte (für 8 Oberflächen)										
1 (Wiese)		17.0	91.5	17.2	32.6	44.5	21.2	26.3	69.0	22.7
2 (Gebüsch)		16.7	92.8	17.2	32.8	51.5	24.8	25.8	72.8	23.2
3 (Wald)		17.0	91.5	17.2	31.7	46.3	21.4	26.2	68.8	23.0
4 (Wasser)		18.1	87.7	17.7	31.2	52.7	23.0	27.4	65.3	23.0
5 (Acker)		15.8	94.7	16.2	33.7	46.7	23.5	25.3	75.7	23.5
6 (Versiegelte Fläche)		18.8	83.0	17.5	33.6	43.0	22.1	29.0	52.7	20.7
7 (Niedrige Bebauung)		16.7	88.0	16.0	32.7	46.7	22.2	27.0	65.3	22.4
8 (Hohe Bebauung)		18.9	83.6	17.5	31.7	48.2	22.0	28.7	54.8	20.9
Oberflächenspezifische Mittelwerte (für 3 Oberflächen)										
Nichtversiegelte Freifläche		16.9	91.6	17.1	32.4	48.3	22.8	26.2	70.3	23.1
Versiegelte Fläche		18.8	83.0	17.5	33.6	43.0	22.1	29.0	52.7	20.7
Bebaute Fläche		17.8	85.8	16.8	32.2	47.4	22.1	27.9	60.1	21.7

Zu allen Tageszeiten die höchsten Temperaturen, betrachtet man die für drei Oberflächenarten gemittelten Werte (Abb. 11), weisen die künstlichen Oberflächen auf, wobei die ausgeprägtesten thermischen Unterschiede nachts auftreten.

Bezüglich des Dampfdrucks (Abb. 12) erstaunt zunächst die Tatsache, daß zum Morgentermin über den natürlichen Oberflächen niedrigere Drücke herrschen als über den versiegelten und bebauten Flächen. Zurückzuführen ist dieses Ergebnis auf nächtlichen Taufall über vegetationsbestandenen Flächen (bei beiden Meßterminen war morgens Taufall festzustellen), woraus ein reduzierter Wasserdampfgehalt in der auflagernden Luftschicht resultiert. Ebenfalls in Betracht zu ziehen sind anthropogene Wasserdampf-freisetzung und verminderte turbulente Durchmischung in bebauten Gebieten.

Ein differenzierteres Bild der thermischen und hygrischen Verhältnisse ergibt sich aus der Darstellung der, für die acht in der Flächenbilanz 1994 unterschiedenen Oberflächenarten ermittelten, Mittelwerte (Abb. 13 - 15 und 16 - 18). Unter den natürlichen Oberflächen weisen Wald- und Wasserflächen den ausgeglichensten Tagesgang auf, wohingegen Gebüsch- und Ackerflächen nachts und morgens kühler, mittags aber bedeutend wärmer sind - am 21.07. weisen die Ackerflächen mittags sogar die absolut höchsten Temperaturen auf.

Besonders am 30.06. sind die Temperaturwerte über den Wiesenflächen bemerkenswert: Während der mittägliche Wert durchaus auf einem zu erwartenden Niveau liegt, fallen morgens und nachts die sehr hohen Temperaturen auf, die nachts das Niveau der versiegelten und bebauten Bereiche erreichen, morgens die Temperaturen über Wald und Wasser deutlich übertreffen. Dies steht in Widerspruch zu der, in der Literatur (z. B. ROBEL 1975) häufig vertretenen und nachvollziehbaren, Auffassung, daß die Luft über Wiesenflächen nachts extrem stark abkühlt, Wiesen deshalb als nächtliche Kaltluftproduzenten angesprochen werden können. Dieses außergewöhnliche Ergebnis ist weder mit einer besonderen Meßstandort-Situation noch durch eine exzeptionelle Wetterlage (wie z. B. kurzfristig verstärkte Advektion) zu erklären.

Über den bebauten Oberflächen wurden nachts und morgens die höchsten Temperaturen gemessen, die Werte der hohen Bebauung liegen dabei meist noch etwas über denen der niedrigen Bebauung. Mittags hingegen liegen die Temperaturen unter denen der

versiegelten Flächen, insbesondere hohe Bebauung bewirkt zu dieser Tageszeit teilweise sogar niedrigere Temperaturen als Vegetationsflächen.

Die relative Luftfeuchtigkeit, das zeigen die Abb. 14 und 17, weist einen zur Temperatur inversen Tagesgang auf, das heißt, bei relativ hohen Lufttemperaturen ist über der jeweiligen Oberfläche eine geringe relative Luftfeuchtigkeit festzustellen und umgekehrt. Interessanter, weil nicht direkt temperaturabhängig, sind die Dampfdruckwerte.

Am 30.06. herrschte zu allen Tageszeiten über der Wasserfläche der höchste Dampfdruck, ebenfalls recht hohe Werte wurden mittags und nachts über Gebüsch-, Wald- und Ackerflächen, morgens bei insgesamt sehr geringen Differenzen, über Wiesen- und bebauten Flächen gemessen.

Sehr viel schwächer ausgeprägt sind die Unterschiede am 21.07.1995. Lediglich nachts ist eine deutliche Tendenz zu höheren Werten über natürlichen Oberflächen zu erkennen. Die morgens, im Vergleich zu Gebüsch und Wald, höheren Dampfdrücke über Wiese und Acker könnten bedingt sein durch, infolge weniger Blattoberflächen, geringere Tauausfällung über diesen Flächen.

Die auffallend hohen mittäglichen Werte über den Gebüschflächen sind ebenfalls in Zusammenhang mit der Gesamtfläche transpirierender Pflanzenteile zu sehen wobei wohl auch die verwendete Meßtechnik zur Gestaltung der Ergebnisse beiträgt.

Um die Mittagszeit weist die stomatäre Transpiration der Pflanzen ihr Maximum auf (NULTSCH 1986: 233 ff.), während der daraus resultierende, direkt über den Pflanzenoberflächen am stärksten ausgeprägte, Anstieg der Dampfdruckwerte bei Messungen über Wiesen und im Wald (Messung in 2 m über den Pflanzenoberflächen bzw. im Stammraum unterhalb des, wesentlich zur Gesamttranspiration beitragenden, Kronenbereichs) nicht in seinem vollen Ausmaß erfaßt wird, liegt der Meßfühler bei Messungen in Gebüschformationen genau in Höhe der extrem transpirierenden Pflanzenorgane.

Legt man einen Dampfdruck von 18.8 hPa als Schwülegrenze zugrunde, so herrschte am 21.07. mittags und nachts über allen Oberflächen Schwüle, morgens lagen die Werte nur geringfügig unter diesem Orientierungswert, so daß dieser Tag ein erhebliches bioklimatologisches Belastungspotential aufweist.

Abbildung 11: Meßfahrten am 30.06.1995 - Lufttemperatur in 2 m Höhe; gemittelt für drei Oberflächenarten

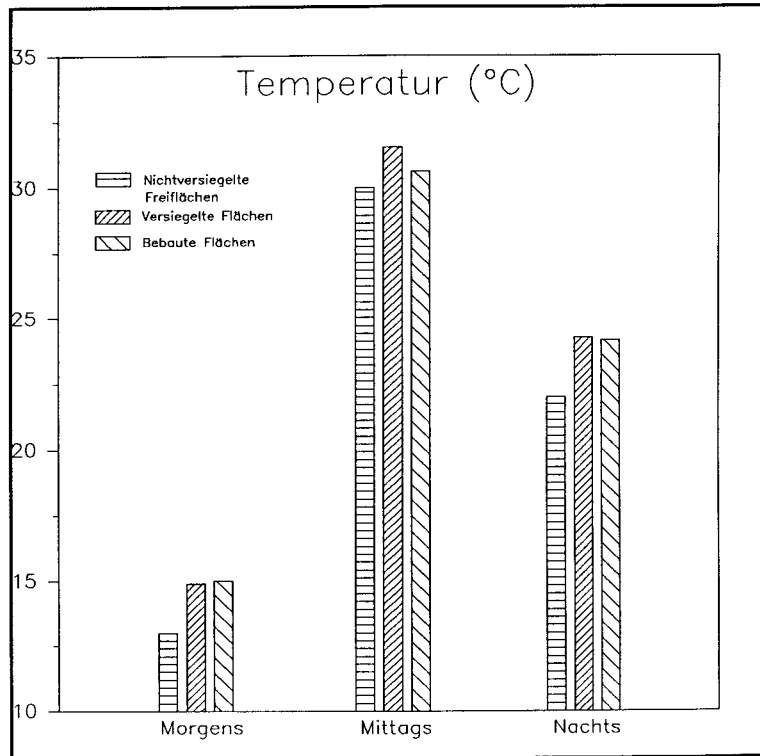


Abbildung 12: Meßfahrten am 30.06.1995 - Dampfdruck in 2 m Höhe; gemittelt für drei Oberflächenarten

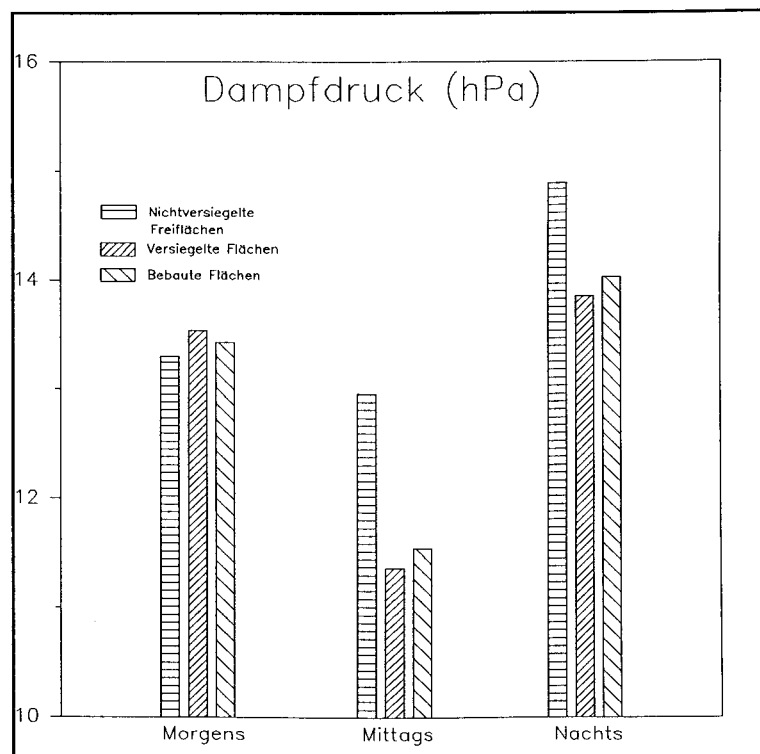


Abbildung 13: Meßfahrten am 30.06.1995 - Lufttemperatur in 2 m Höhe; gemittelt für acht Oberflächenarten

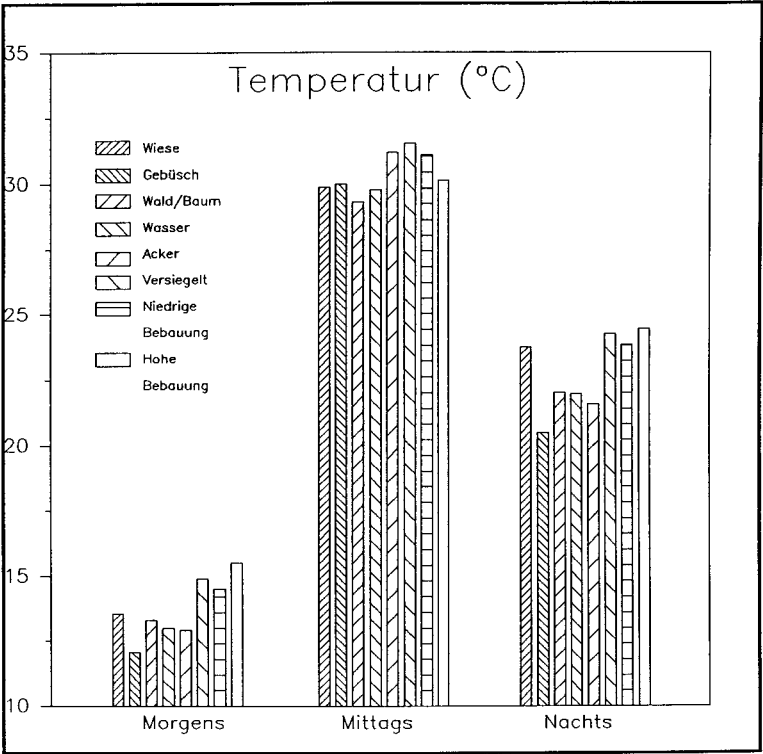


Abbildung 14: Meßfahrten am 30.06.1995 - Relative Luftfeuchtigkeit in 2 m Höhe; gemittelt für acht Oberflächenarten

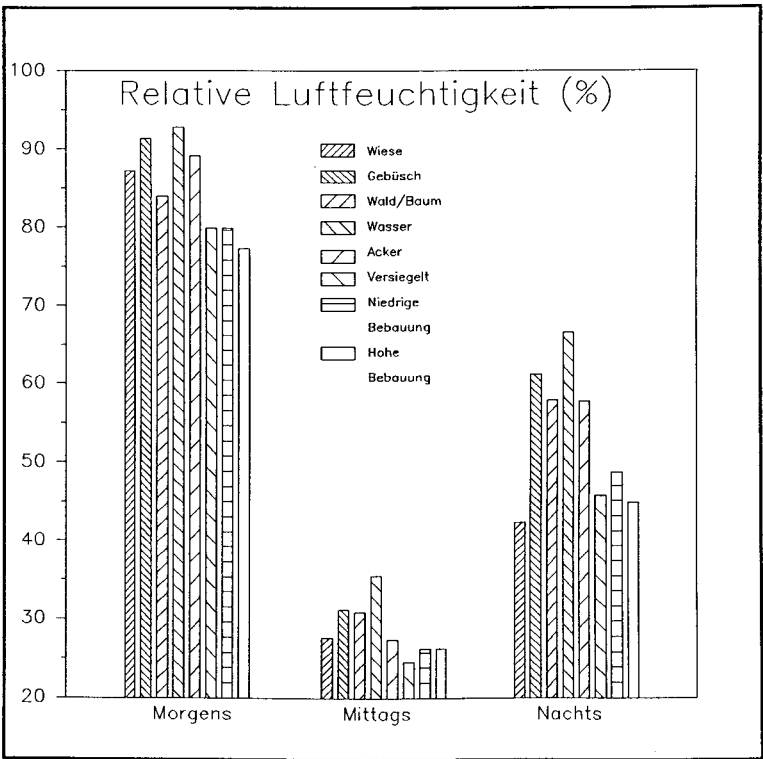


Abbildung 15: Meßfahrten am 30.06.1995 - Dampfdruck in 2 m Höhe; gemittelt für acht Oberflächenarten

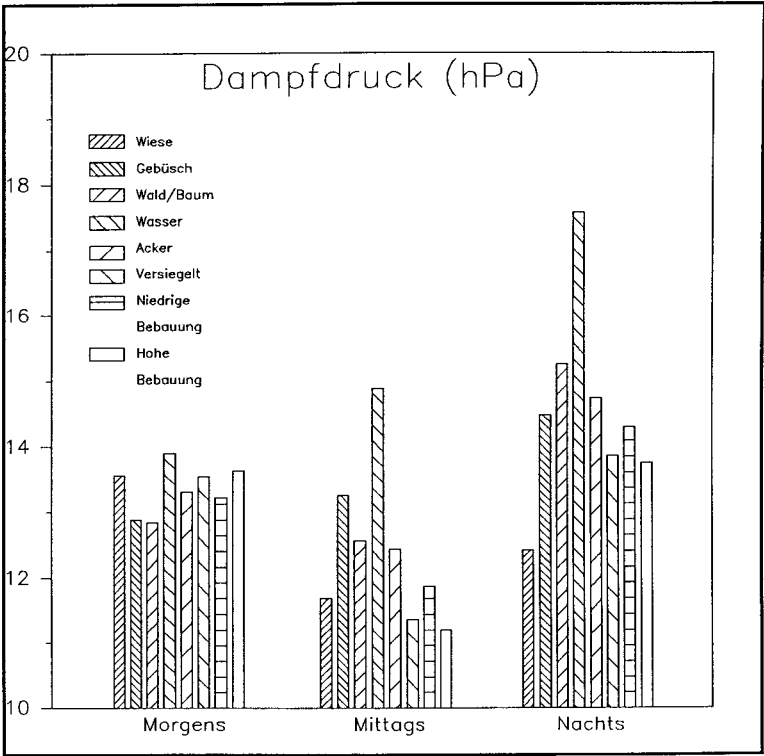


Abbildung 16: Meßfahrten am 21.07.1995 - Lufttemperatur in 2 m Höhe; gemittelt für acht Oberflächenarten

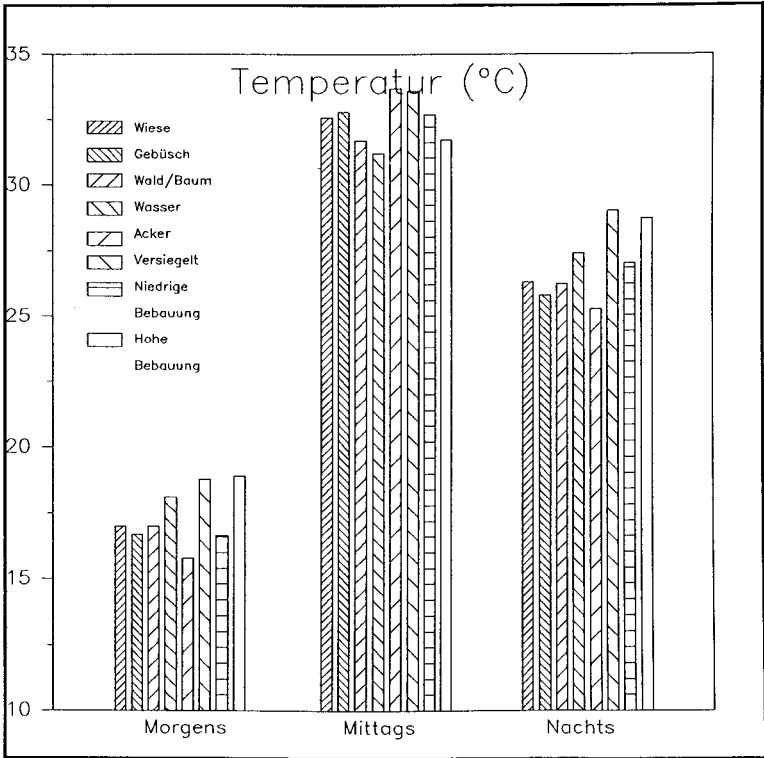


Abbildung 17: Meßfahrten am 21.07.1995 - Relative Luftfeuchtigkeit in 2 m Höhe; gemittelt für acht Oberflächenarten

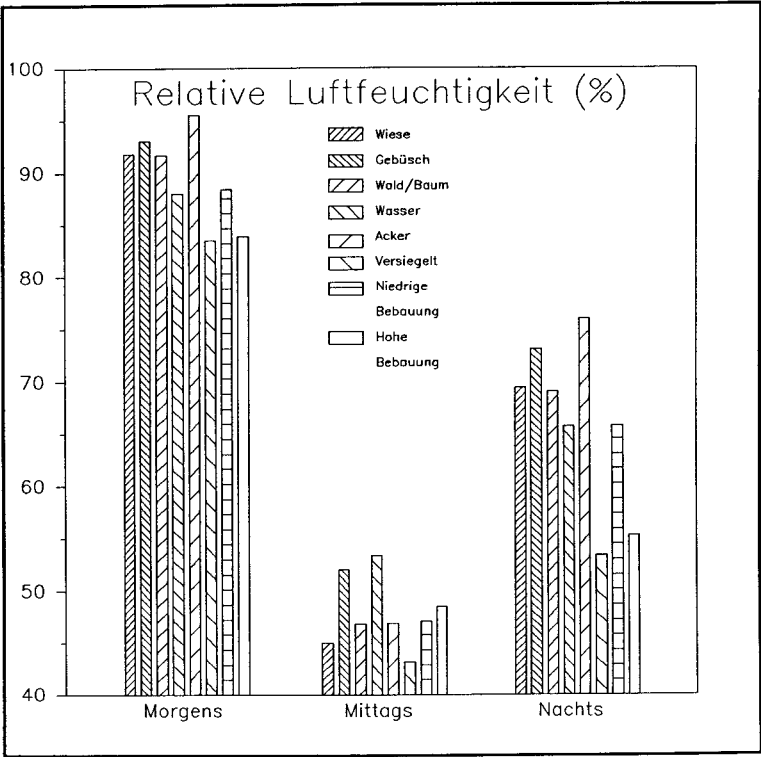
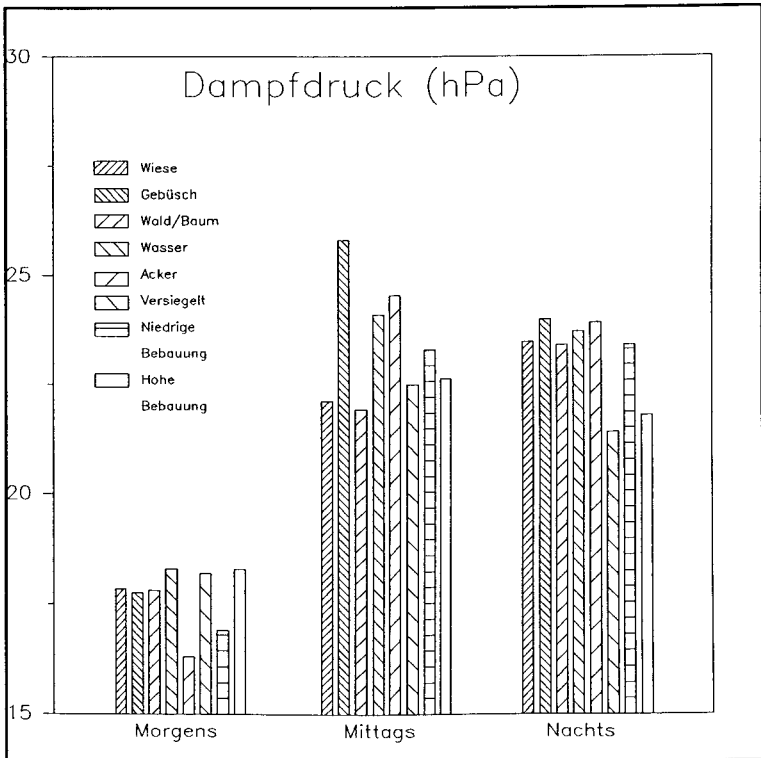


Abbildung 18: Meßfahrten am 21.07.1995 - Dampfdruck in 2 m Höhe; gemittelt für acht Oberflächenarten



5 Thermische und hygrische Veränderungen 1983 - 1994

5.1 Verfahren zur Berechnung der Klimaänderungen

Auf Grundlage der Flächenbilanzen und der Klimamessungen können, durch Verknüpfung der Oberflächen- und Klimadaten, in modellhafter Annäherung die thermischen und hygrischen Verhältnisse in ihrer räumlichen Differenzierung für drei Tageszeiten berechnet werden und in Form von Karten zur Darstellung gelangen.

Die Berechnung von Temperatur und Dampfdruck für jedes 100 m × 100 m-Raster erfolgt, innerhalb eines FORTRAN-Programms, folgendermaßen:

Für jede im betrachteten Raster vertretene Oberflächenart wird der Flächenanteil (in %) mit dem oberflächenspezifischen Klimawert multipliziert, die so erhaltenen Werte werden aufsummiert und durch 100 dividiert. Auf diese Weise bildet man für jedes Raster den gewichteten Mittelwert aus den oberflächentypischen Temperaturen bzw. Dampfdrücken. Wird der nach diesem Berechnungsmodus für 1983 ermittelte Wert von dem für 1994 errechneten subtrahiert, so erhält man den positiven oder negativen Wert der, durch die in diesem Zeitraum eingetretenen Oberflächenmodifikationen induzierten Klimaänderung.²⁰

Die kartographische Darstellung der räumlichen Verteilung der nun für jedes 1 ha-Raster vorliegenden Differenzwerte kann entweder durch verschiedene Rastersignaturen - entsprechend den Karten 4 - 13 - oder aber durch Isolinien erfolgen. Aufgrund der größeren Übersichtlichkeit und der Möglichkeit feinere Abstufungen innerhalb des Werteintervalls zu visualisieren, entschied ich mich für letztere Variante. Die Berechnung der Isanomalien - in diesem Fall Linien gleicher Temperatur- bzw. Dampfdruckänderung - erfolgte innerhalb des in 1.2.2 erwähnten Kartographieprogrammes mit Hilfe einer ERLGRAPH Routine durch lineare Interpolation der Rasterdaten, wobei der Temperatur- bzw. Feuchtigkeitswert des jeweiligen Rasters im Rastermittelpunkt verortet wird. Der Isolinienabstand beträgt für alle Karten der thermischen Veränderungen 0,2 °C, die Isanomalien der Dampfdruckänderungen sind, in Anpassung an die jeweilige Streuung der

²⁰ Die 1983 nicht bearbeiteten Raster, die nicht nacherhoben werden konnten (siehe 3.2.2) und für die folglich auch keine Berechnung möglich war wurden dabei ausgeklammert, für die kartographische Darstellung erhielten sie den Wert Null.

Werte, im Abstand von 0,2 hPa (Mittags und Nachts) bzw. 0,04 hPa (Morgens) gezeichnet.²¹ Nicht dargestellt ist die Nullinie (d. h. keine Modifikation der klimatischen Zustände), da ihr sehr unregelmäßiger Verlauf die Übersichtlichkeit der Karten stark beeinträchtigen würde.

5.2 Ergebnisse

Tabelle 9 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die Veränderungen von Temperatur und Dampfdruck von 1983 - 1994, die in den Karten 16 - 27 in ihrer räumlichen Differenzierung dargestellt sind.

Tabelle 9: Veränderungen von Lufttemperatur und Dampfdruck in 2 m Höhe 1983 - 1994

Untersuchungsgebiet	Untersuchungsgebiet 1			Untersuchungsgebiet 2		
Tageszeit	Morgens	Mittags	Nachts	Morgens	Mittags	Nachts
Lufttemperatur in 2m Höhe (°C)						
Mittelwert	0.05	0.02	0.05	0.21	0.14	0.24
Maximum	1.89	1.23	2.18	1.93	1.48	2.26
Minimum	-1.63	-1.30	-1.93	-0.83	-0.79	-0.92
Dampfdruck in 2 m Höhe (hPa)						
Mittelwert	0.00	-0.04	-0.02	0.02	-0.17	-0.11
Maximum	0.20	1.37	0.89	0.24	0.65	0.43
Minimum	-0.21	-1.50	-0.96	-0.12	-1.59	-1.03

Betzüglich der thermischen Verhältnisse sind die stärksten Veränderungen zum Nachttermin festzustellen (maximal 2,3 °C Zunahme; maximal -1,9 °C Abnahme). Die geringsten Veränderungen ergeben sich mittags mit maximal 1,5 °C bzw. -1,3 °C.

²¹ GERTH (1986: 22) schlägt die doppelte Varianz des darzustellenden Datenkollektivs als Mindestabstand der Isolinien vor; diese Forderung wird mit der von mir getroffenen Abstufung nicht in allen Fällen erfüllt, um die Karten untereinander leichter vergleichbar zu machen verzichtete ich aber darauf für jedes Wertefeld einen neuen Abstand zu definieren.

Die Dampfdruckwerte hingegen zeigen zum mittäglichen Termin das größte Ausmaß an Veränderung (maximal -1,5 hPa bzw. 1,4 hPa), während die Modifikationen vor Sonnenaufgang minimal sind (maximal -0,2 hPa bzw. 0,2 hPa).

Die Karten zeigen für beträchtliche Bereiche der Untersuchungsgebiete Temperaturzunahmen, die ihr jeweils größtes Ausmaß auf den Flächen erreichen, wo die stärksten Zunahmen der versiegelten und bebauten Flächen zu verzeichnen sind.

Größere Bereiche mit, gegenüber 1983, niedrigeren Temperaturen fallen nur im Untersuchungsgebiet 1 auf und zwar zum einen auf den Flächen die zwar stark bebaut wurden, auf denen aber gleichzeitig eine Umwandlung versiegelter Flächen in Vegetationsflächen stattfand, zum anderen in entsiegelten Gebieten (siehe 3.4.2).

Insbesondere für Bereiche, in denen eine Umwandlung von Ackerflächen in Bauland stattfand (Beispielsweise in Randgebieten von Rottenbauer), ist unter bestimmten Voraussetzungen - Realisierung stark durchgrünter Bebauung - nicht unbedingt eine den vorgestellten Ergebnissen konforme Entwicklung zu erwarten. Die, im Unterschied zu Ackerflächen, klimamildernde Wirkung vor allem vertikal strukturierter Vegetationsformationen, die in der Lage ist die temperaturerhöhende Wirkung von Versiegelung und Bebauung zu reduzieren (JACOBET 1991) oder sogar überzukompensieren, läßt sich bei Beschränkung auf drei Oberflächenarten natürlich nicht in die Berechnung miteinbeziehen. Ein Beispiel soll verdeutlichen, daß daraus in erheblichem Maße verfälschte Ergebnisse resultieren können: Die Umwandlung einer 1 ha-Ackerfläche in eine stark durchgrünte Wohnbebauung (50 % Wiese, 10 % Baumbestand, 20 % Versiegelte Flächen und 20 % Niedrige Bebauung) bewirkt bei Differenzierung von drei Oberflächenarten eine Temperaturzunahme von 30,0 °C auf 30,4 °C, unterscheidet man dagegen acht Oberflächentypen, so ist im Gegenteil sogar eine Abkühlung von 31,2 °C auf 30,4 °C festzustellen (siehe Tabelle 7).

Eine relativ abwechslungsreiche, stark durchgrünte Bebauung ist in den, zwischen 1983 und 1994 entstandenen Wohngebieten am Heuchelhof (Wiener Ring, Madrider Ring, Prager Ring, Athener Ring) realisiert. In diesen Gebieten ist teilweise - nämlich in den Bereichen, für die 1983 nicht vollständig versiegelte Flächen bilanziert (siehe 3.4.2) und in der Folge Temperaturabnahmen registriert wurden (also Prager und Athener Ring sowie Bereiche entlang der Berner Str.) - mit einer geringeren Temperaturerhöhung als in den

Karten dargestellt, eventuell sogar mit einer Temperaturreduzierung (siehe obiges Berechnungsbeispiel) zu rechnen. Die Umwandlung in mehr oder weniger vollständig versiegelte und bebaute Flächen, wie beispielsweise in den Gewerbegebieten Wöllrieder Hof und zwischen Heuchelhof und Rottenbauer, wird hingegen, zumindest bezüglich der Richtung ihrer thermischen Auswirkungen, korrekt wiedergegeben.

Bezüglich der thermischen Verhältnisse sind zwar tageszeitliche Unterschiede des Betrages der Modifikationen, jedoch keine Vorzeichenumkehrungen oder Verlagerungen der Kernbereiche thermischer Veränderungen festzustellen. Eine, in dieser Hinsicht, feinere Differenzierung war aufgrund der, die realen Verhältnisse sehr stark vereinfachenden wenn nicht gar verfälschenden, Zusammenfassung der verschiedenen Oberflächen zu nur drei Klassen aber auch nicht zu erwarten. Befriedigendere Ergebnisse würde natürlich der Vergleich der Flächenbilanzdaten 1994 mit einer entsprechend detaillierten älteren, leider nicht vorhandenen, Erfassung liefern (Zum Vergleich der beiden Flächenbilanzmethoden siehe 6.1).

Die Dampfdruckänderungen zeigen die gleichen räumlichen Verbreitungsmuster wie die Temperaturänderungen. Während sich Mittags- und Nachttermin lediglich im Ausmaß der Veränderungen unterscheiden, die Bereiche reduzierter bzw. erhöhter Werte aber übereinstimmen, bietet die Darstellung des Morgentermins ein davon abweichendes Bild. Vor Sonnenaufgang sind die Bereiche mit starker Anteilssteigerung künstlicher Oberflächen und damit auch erhöhten Lufttemperaturen nicht, wie zu den anderen Tageszeiten, gleichzeitig Gebiete mit reduzierten Dampfdrücken, sondern im Gegenteil durch erhöhte Wasserdampfgehalte der Luft ausgezeichnet (siehe auch 4.2.3). Die Aussagekraft der Darstellungen der Feuchtigkeitsverhältnisse unterliegt den gleichen methodenbedingten Einschränkungen, die für die thermischen Verhältnisse erörtert wurden.

Es stellt sich nun die Frage, wie diese Ergebnisse hinsichtlich ihrer bioklimatischen Bedeutsamkeit bewertet und inwieweit daraus Vorschläge für stadtplanerische Aktivitäten abgeleitet werden können. Als äußerst ungünstig ist die Kombination von Temperatur- und Dampfdruckzunahme über, seit 1983 stark versiegelten und bebauten Flächen, wie sie in den Karten 16 und 19 bzw. 22 und 25 zum Ausdruck kommt, zu bezeichnen. Dies gilt vor allem, wenn dabei Schwülezustände eintreten, die das menschliche Wohlbefinden negativ beeinträchtigen. Auch die Tendenz zu höheren nächtlichen Temperaturen ist im

Sommerhalbjahr als Nachteil zu betrachten. Von gesteigerter Relevanz ist dieses, als Belastung empfundene Ausbleiben oder stark reduzierte Ausmaß abendlicher Abkühlung in Wohngebieten. Daß aber eine generelle Negativ-Bewertung der klimatischen Auswirkungen versiegelter und bebauter Strukturen unangebracht ist, folgte bereits aus der Erörterung der Ergebnisse der Meßfahrten (4.2.3), die zeigten, daß beispielsweise über Vegetationsflächen maximale Schwülewerte erreicht werden. Die bioklimatologisch grundsätzlich positiv zu wertende Transpiration von Vegetationsbeständen mit der daraus resultierenden transpirativen Abkühlung wird bei mangelnder turbulenter Durchmischung durch die Anreicherung von Wasserdampf in der Atmosphäre - insbesondere bei Überschreitung der Schwülegrenze - zum Auslöser bioklimatischer Ungunstsituationen. Bei ausreichender Durchlüftung hingegen können hohe Temperaturen und niedrige Feuchtigkeitswerte über benachbarten, beispielsweise versiegelten Flächen ausgeglichen und so insgesamt vorteilhaftere bioklimatische Bedingungen erreicht werden.

Anzustreben ist also die Schaffung eines Oberflächenmosaiks, das sich aus Strukturen mit unterschiedlichem klimatischen Verhalten zusammensetzt und in dem, durch thermisch induzierte kleinräumige Zirkulationen oder, bei entsprechender Wetterlage, durch übergeordnete Strömungen ein horizontaler Luftmassenaustausch stattfinden kann. Desweiteren sollten Planungsvorschläge auch die Erhaltung oder Anlage bioklimatischer Entlastungsräume - beispielsweise ausgeprägt vertikal gegliederte Vegetationsformationen innerhalb bzw. in erreichbarer Nähe von Wohngebieten - enthalten.

Vermieden werden sollten demzufolge bauliche Strukturen, die die Stagnation von Luftmassen und damit die Ausbildung klimatischer Extremstandorte fördern (z. B. homogen strukturierte geschlossene Innenhöfe) sowie flächenmäßig sehr ausgedehnte, oberflächenstrukturell gleichförmig gestaltete Bereiche (z. B. große versiegelte Flächen, über denen bei Einstrahlung Maximaltemperaturen erreicht werden).

6 Methodische Erweiterungen des Stadtklimamodells auf Basis der Flächenbilanzergebnisse 1994

6.1 Ausgangspunkt und Zielvorstellungen

Mit den, räumlich und sachlich hochaufgelösten, Ergebnissen der Flächenbilanz 1994 liegt eine Datenbasis vor, die es nunmehr ermöglicht verschiedene methodische Varianten des beschriebenen Berechnungsmodus, zur Extrapolation der Klimadaten in die Fläche, zu formulieren und durchzuführen.

Ziel soll es dabei sein, festzustellen inwieweit sich die Ergebnisse unterscheiden und welche Eignung sie für die Bearbeitung unterschiedlicher Fragestellungen besitzen könnten. In einem weiterführenden Schritt möchte ich sodann versuchen, durch die Entwicklung neuer Berechnungsansätze, eine realistischere Modellierung der Temperaturverhältnisse zu erreichen.

Bei diesen Arbeiten beschränkte ich mich auf die Darstellung der thermischen Verhältnisse, vorwiegend des Nachttermins, wobei die Temperaturwerte der Meßfahrten vom 21.07.1995 zur Berechnung herangezogen wurden. Die resultierenden Isolinien-Plots werden aus Einschränkungsgründen nicht als Karten, sondern als schwarz-weiß-Abbildungen im Maßstab 1 : 30000 (Gesamtgebiete) bzw. 1 : 8000 (Ausschnittsvergrößerungen) präsentiert, wobei die topographischen Hintergrundinformationen zur besseren Unterscheidung farbig - entsprechend den Kartenlegenden - konturiert wurden. Um die höhenbedingte thermische Differenzierung zu berücksichtigen, wurden die berechneten Temperaturwerte der einzelnen Raster unter Annahme eines vertikalen Gradienten von -0.3 °C korrigiert. Dargestellt sind jeweils die negativen (gestrichelte Linien) und positiven (durchgezogene Linien) Abweichungen vom tageszeitlichen Mittelwert im jeweiligen Untersuchungsgebiet (siehe Tabelle 10), der näherungsweise aus den Mittelwerten aller berechneten Wertefelder ermittelt wurde.

Tabelle 10: Tageszeitliche Mittelwerte der Temperatur (21.07.1995)

	Untersuchungsgebiet 1	Untersuchungsgebiet 2
Morgens	16.5	16.9
Mittags	32.8	33.1
Nachts	26.0	26.5

Bevor verschiedene Modifikationen vorgestellt werden, soll an einem Beispiel aufgezeigt werden, daß die Unterscheidung von acht Oberflächenarten, in der von mir durchgeführten Flächenbilanz, eine deutlich bessere Darstellung der thermischen Verhältnisse liefert, als die 1983 durchgeführte Differenzierung von lediglich drei Typen.

Vergleicht man die Abbildungen 19 und 20, so fällt die bedeutend differenziertere Wiedergabe des Temperaturfeldes in Abb. 20 auf. Während in Abb. 19 alle nicht-versiegelten Freiflächen als Gebiete negativer Temperaturabweichungen erscheinen, ist in Abb. 20 eine deutliche Unterscheidung zwischen relativ kühlen Waldgebieten und Wasserflächen einerseits und relativ warmen Gebüschformationen, sowie Wiesen- und Ackerflächen andererseits festzustellen. Die Bildung des Temperaturwertes für die Oberflächenart Bebaute Flächen durch Mittelung der Meßwerte für Hohe und Niedrige Bebauung bei Zugrundelegung von drei Oberflächenarten, bewirkt eine, nicht der Realität entsprechende Darstellung fast aller bebauten Flächen als Bereiche negativer Temperaturabweichungen - z.B. ganz Rottenbauer; realitätsnäher ist die in Abb. 20 zum Ausdruck kommende Beschränkung kühlerer Temperaturen auf diejenigen Bereiche, in denen Hohe Bebauung die dominierende Oberflächenart ist. Diese Beispiele bestätigen, was auch schon die Erörterung der Meßergebnisse zeigte, nämlich, daß der Mehraufwand zur Bilanzierung von acht anstatt von drei Oberflächenarten durchaus gerechtfertigt ist und deutlich bessere, weil realistischere, Annäherungen an die klimatischen Realitäten ermöglicht.

Abbildung 19: Untersuchungsgebiet 1; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert
- Mittags; 100 m Rasterkantenlänge; 3 Oberflächenarten differenziert

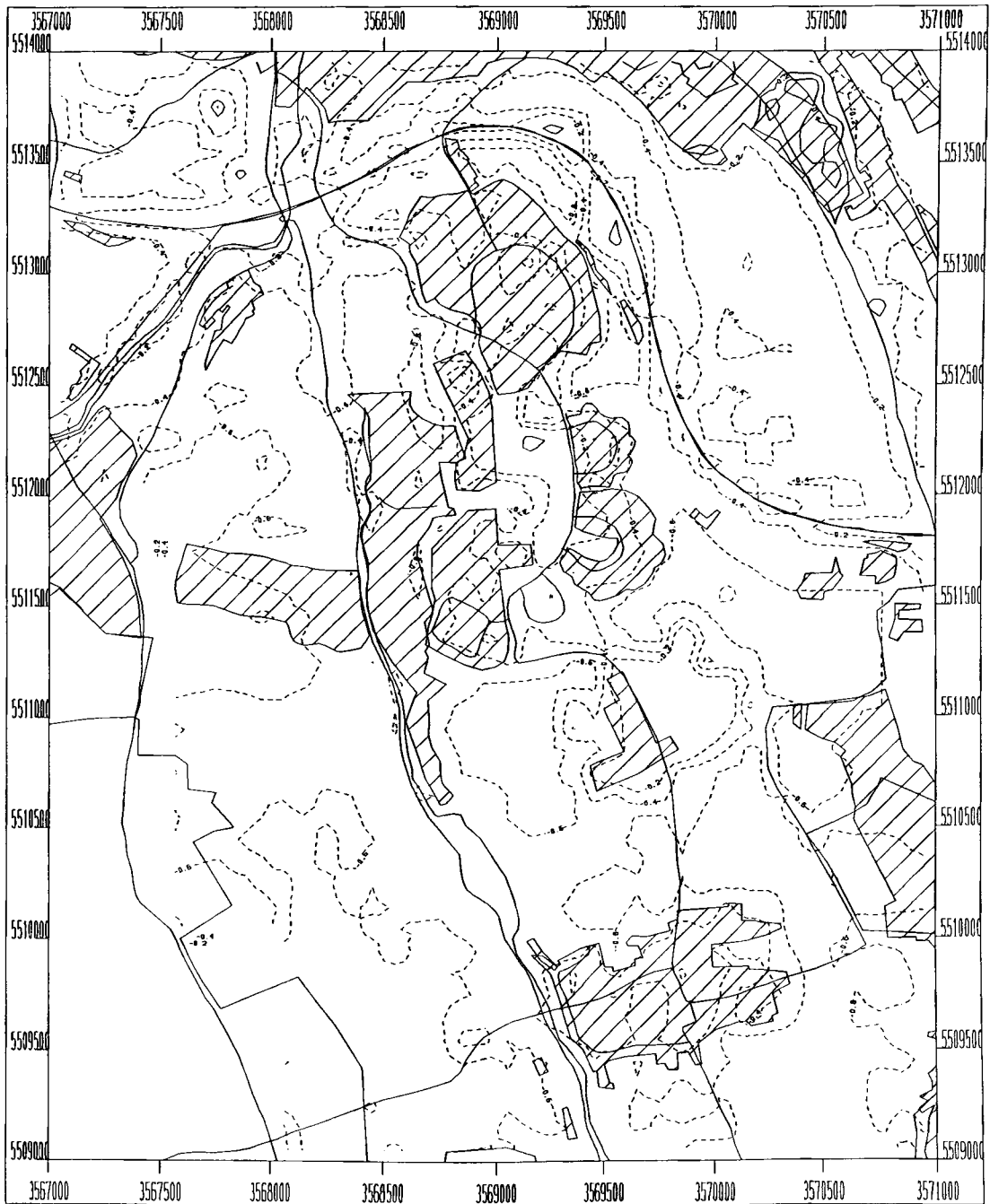


Abbildung 20: Untersuchungsgebiet 1; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert
- Mittags; 100 m Rasterkantenlänge; 8 Oberflächenarten differenziert



6.2 Variationen der Rastergröße und Einführung von Rasterüberlappungen

Ausgehend von der bisher, für die Berechnung der Temperaturfelder, verwendeten Rastergröße von $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ wird nun die Ermittlung der Temperatur sowohl für kleinere - minimal $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ - als auch für größere Raster durchgeführt - maximal 500 m Rasterkantenlänge, wobei der, für die Abschätzung der thermischen und hygrischen Veränderungen verwendete Berechnungsmodus zunächst beibehalten wird.

Von den insgesamt berechneten Temperaturfeldern möchte ich nur einige in Form von Abbildungen vorstellen, um einen Eindruck zu vermitteln, welche Auswirkungen Variationen der Rastergröße auf die Darstellung der thermischen Verhältnisse haben.

Eine Rastervergrößerung bedeutet, daß die Temperaturwerte, als gewichtete Mittelwerte der oberflächenspezifischen Temperaturen, aus immer größeren Arealen berechnet werden, daraus folgt eine Abnahme der Anzahl der, für die Konstruktion der Isothermen herangezogenen, Gitterpunkte (Rastermittelpunkte).

Betrachtet man zunächst einige deskriptive statistische Kennwerte der, auf der Grundlage verschiedener Rastergrößen, berechneten Temperaturfelder (Tabelle 11) so fällt folgendes auf:

Während der Mittelwert bei allen Rastergrößen im wesentlichen gleich bleibt - Unterschiede treten erst ab der zweiten Nachkommastelle auf, nehmen mit zunehmender Rasterkantenlänge die Streuungsmaße (Spannweite, Varianz und Standardabweichung) der Datenkollektive ab, die Temperaturen konzentrieren sich also zunehmend stärker um den Mittelwert, Extremwerte werden seltener.

Tabelle 11: Deskriptive statistische Kennwerte einiger Temperaturfelder, berechnet auf Basis verschiedener Rastergrößen (Untersuchungsgebiet 1 - Nachts)

Rasterkan- tenlänge	Mittelwert (°C)	Minimum	Maximum	Varianz	Standard- abweichung
20 m	26.0	25.0	29.1	1.0	1.0
40 m	26.0	25.0	29.1	0.9	0.9
60 m	26.0	25.0	29.1	0.9	0.8
80 m	26.0	25.0	28.9	0.9	0.8
100 m	26.0	25.0	28.9	0.9	0.8
120 m	26.0	25.0	28.8	0.8	0.7
140 m	26.0	25.0	28.7	0.8	0.7
160 m	26.0	25.0	28.6	0.8	0.7
180 m	26.0	25.0	28.3	0.8	0.6
200 m	26.0	25.0	28.5	0.8	0.6
220 m	26.0	25.0	28.5	0.8	0.6
260 m	26.0	25.0	28.3	0.8	0.6
300 m	26.0	25.0	28.2	0.7	0.5
400 m	26.0	25.0	27.9	0.7	0.4
500 m	26.0	25.1	27.8	0.7	0.4

Diese Entwicklung wird in den Abbildungen 21 bis 24 in anschaulicher Weise deutlich. Es findet ein zunehmender Ausgleich kleinräumiger Unterschiede statt, während großräumige Strukturen im wesentlichen erhalten bleiben. Die temperaturbeeinflussende Wirkung, die von relativ kleinen isolierten Flächen ausgeht ist in Abb. 21 noch deutlich zu erkennen - z. B. ausgeprägte positive Abweichungen über den Wasserflächen im nordöstlichen Quadranten, mit fortschreitender Rastervergrößerung werden diese kleinräumigen Anomalien undeutlicher (Abb. 22) und schließlich ganz von größerskaligen Strukturen verdeckt, bzw. in diese einbezogen (Abb. 23, 24). Dagegen bleiben die thermischen Gegensätze zwischen großflächigeren Arealen unterschiedlicher Oberflächen-

Abbildung 21: Untersuchungsgebiet 2; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert
- Nachts; 40 m Rasterkantenlänge

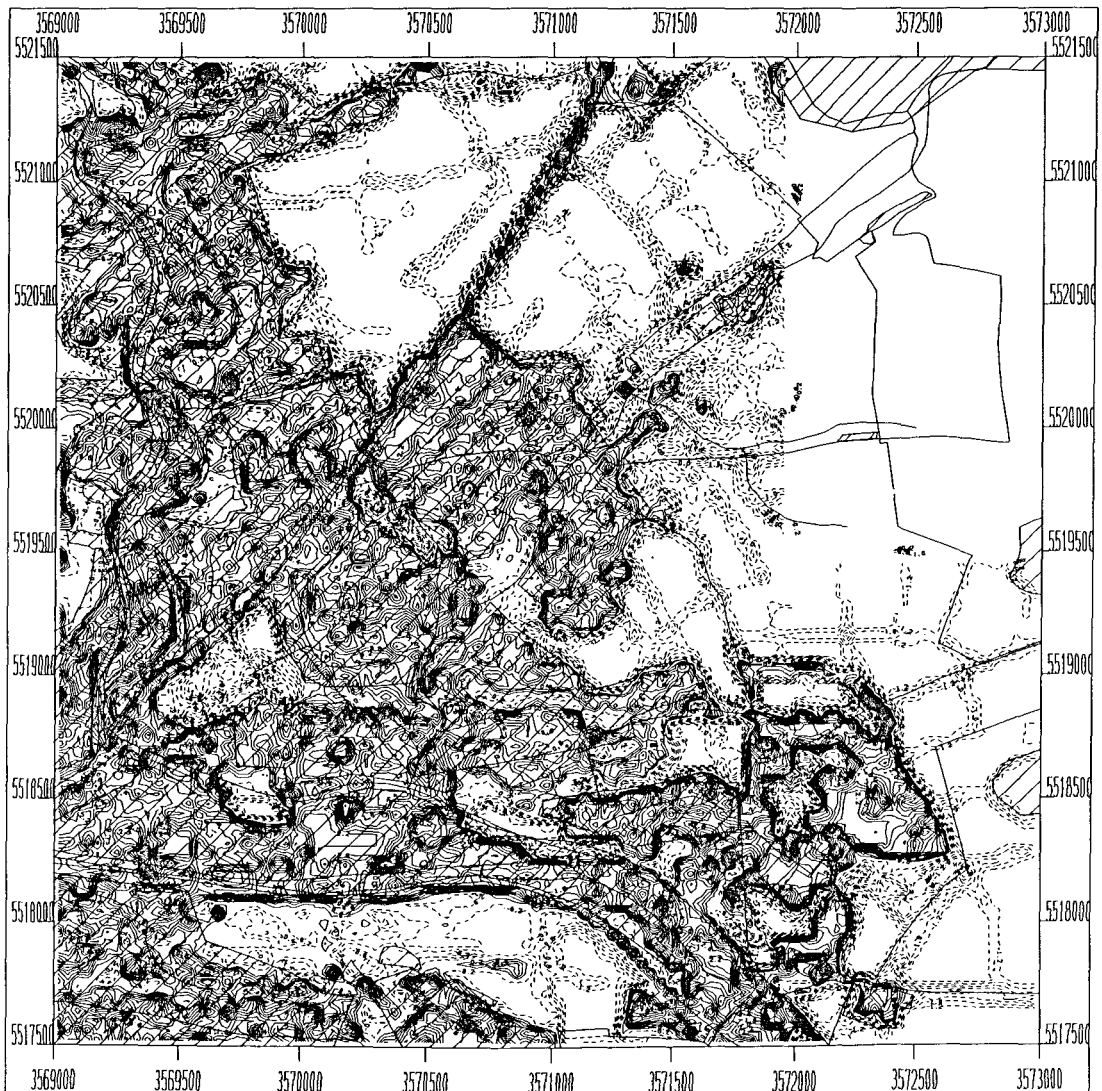


Abbildung 22: Untersuchungsgebiet 2; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert
- Nachts; 100 m Rasterkantenlänge

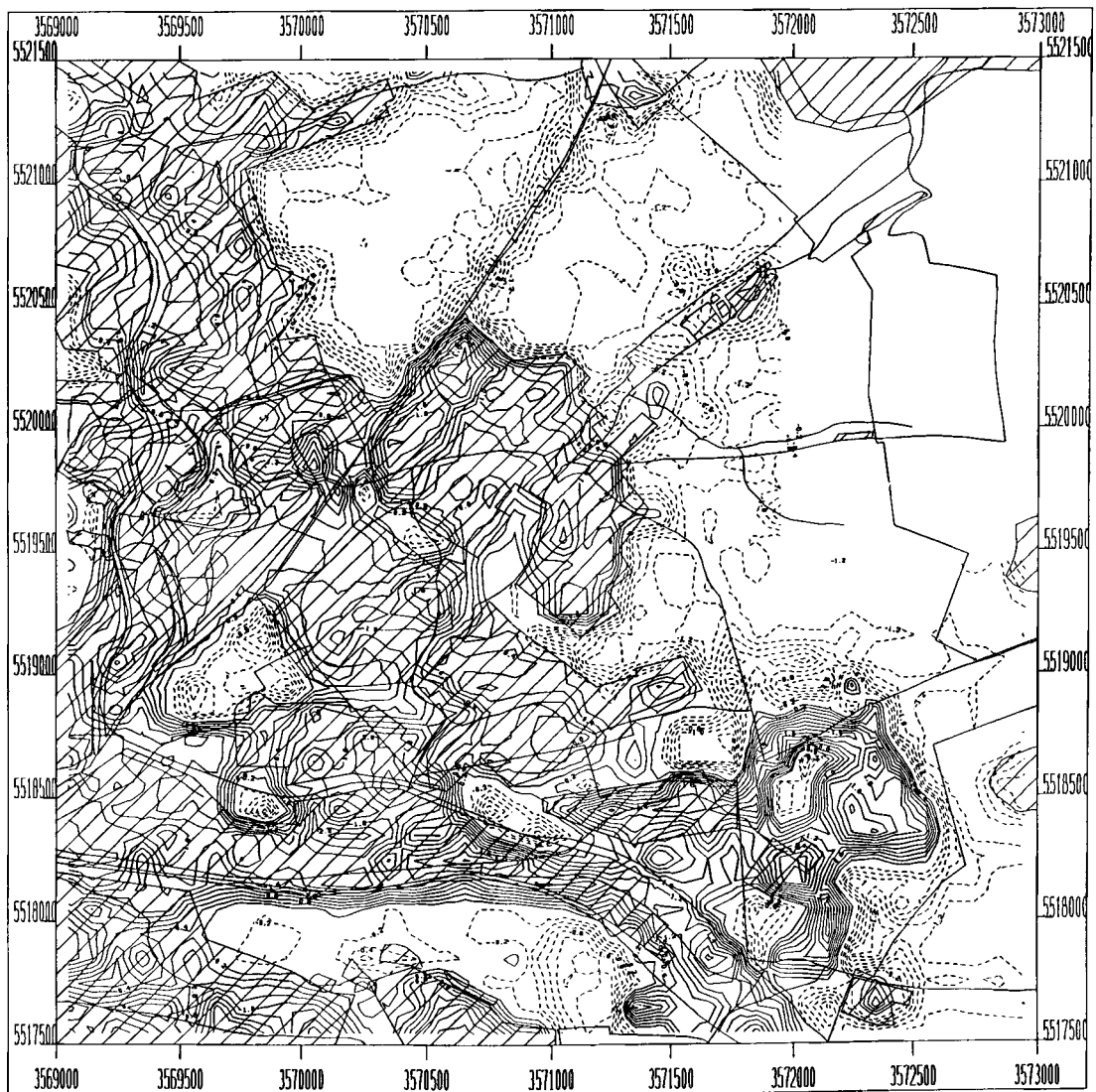


Abbildung 23: Untersuchungsgebiet 2; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert
- Nachts; 200 m Rasterkantenlänge

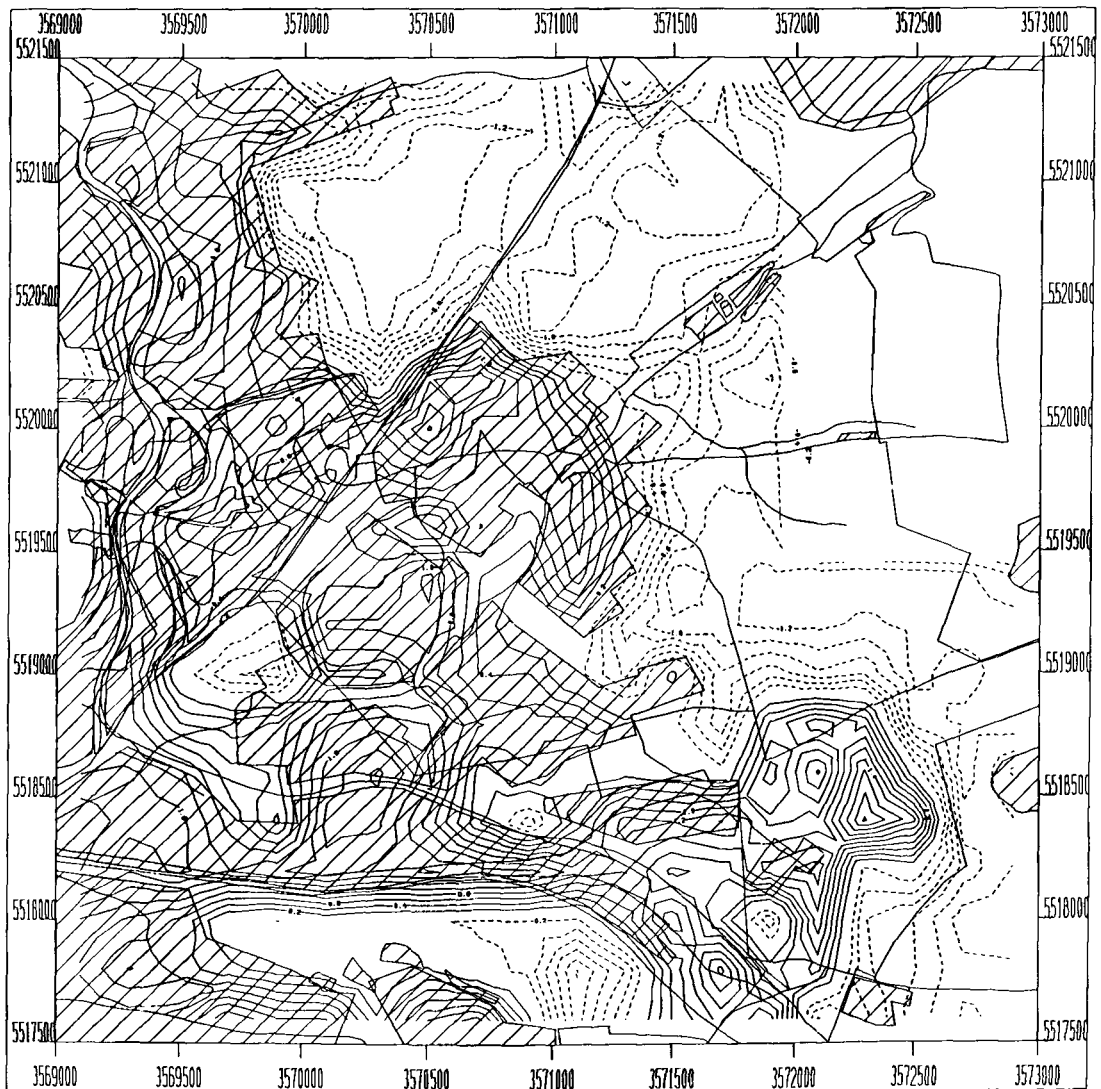
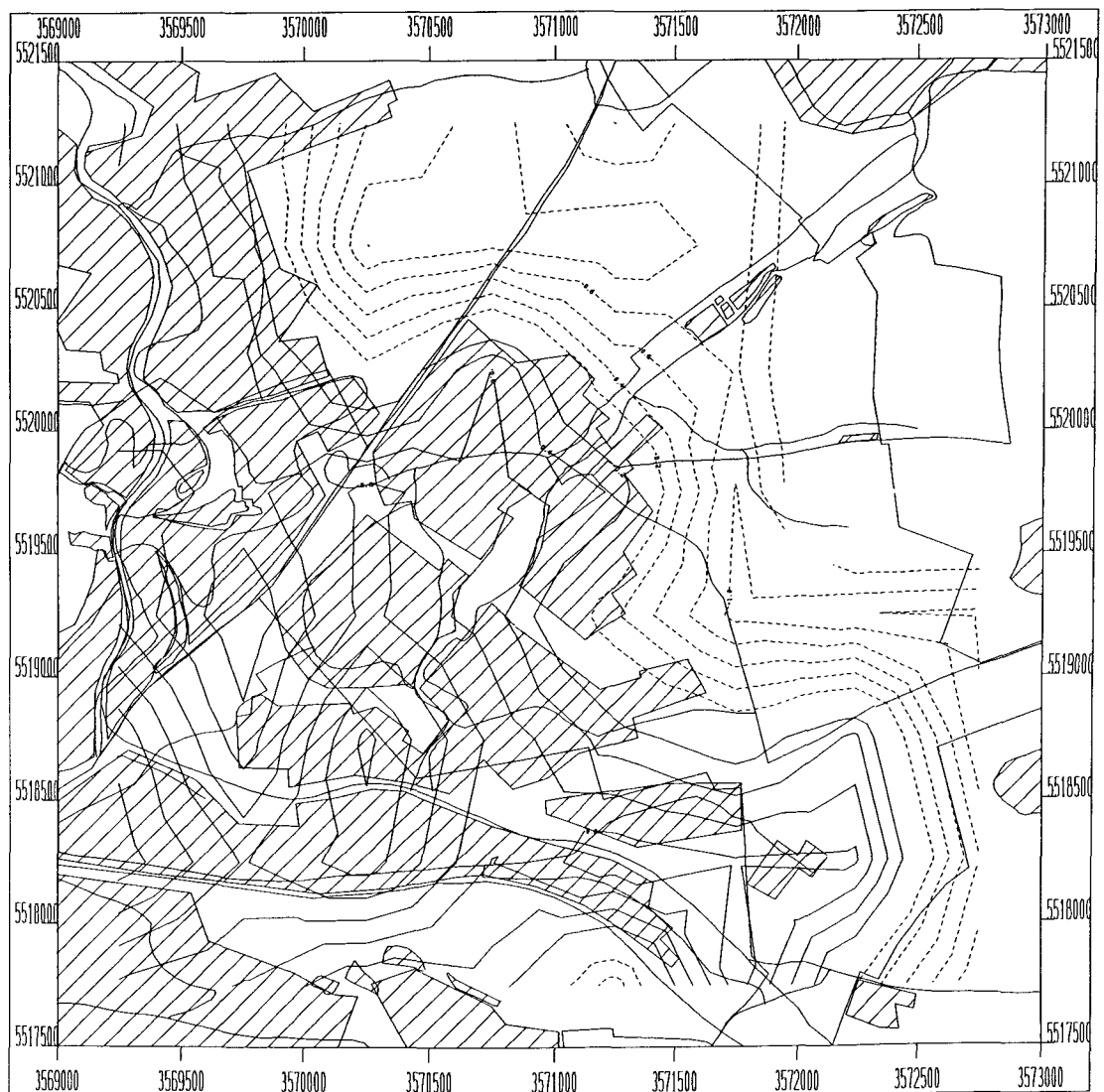


Abbildung 24: Untersuchungsgebiet 2; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert
- Nachts; 500 m Rasterkantenlänge



zusammensetzung auch bei Rastervergrößerung sehr gut erkennbar, so beispielsweise der Unterschied zwischen wärmeren, da mehrheitlich bebauten und versiegelten, Bereichen in der Südwesthälfte des Gebietes und kühleren nichtversiegelten Flächen in der nordöstlichen Gebietshälfte.

Führt man nun zusätzlich zur Variation der Rastergröße eine, in ihrem Ausmaß ebenfalls variable - minimal: 20 m, maximal: Rasterkantenlänge minus 20 m - gegenseitige Überlappung der Raster ein, so wird die Anzahl der Gitterpunkte wieder erhöht, die Interpolation, die ja einen linearen Temperaturgradienten zwischen zu interpolierenden Gitterpunkten zugrundelegt, erfolgt über geringere Distanzen, so daß im Ergebnis eine, gegenüber der Berechnung gleichgroßer nichtüberlappender Raster, differenziertere Darstellung des thermischen Milieus zu erwarten ist. Die Abbildungen 25 - 27 zeigen einige Ergebnisse der Temperaturberechnung mit überlappenden Rastern.

Je größer der Betrag der Überlappung ist, umso mehr nimmt, gegenüber gleichgroßen nichtüberlappenden Rastern, die Differenzierung der Isolinienverläufe zu. Die Unterdrückung kleinräumiger Strukturen, als auffälligste Folge der Rastervergrößerung, bleibt dabei aber erhalten.

Die Eignung bestimmter Rastergrößen als Grundlage für die Modellierung des thermischen Milieus ist von der bearbeiteten Fragestellung und, ganz wesentlich, von dem für die Darstellung verwendeten Maßstab abhängig. Das heißt, je mehr Wert auf die detaillierte Wiedergabe kleinräumiger thermischer Differenzierungen gelegt wird, umso kleiner ist das Raster zu wählen. Eine praktische Anwendung, solcher räumlich hochauflösender Berechnungen, könnte beispielsweise in der Simulation verschiedener Nutzungsvarianten bei der kleinräumigen Bebauungsplanung bestehen.

Gilt das Hauptaugenmerk der Untersuchungen dagegen großräumigen Temperaturdifferenzierungen, z. B. dem Ausmaß und der räumlichen Ausdehnung der städtischen Wärmeanomalie, stellen größere Raster die geeignetere Berechnungsgrundlage dar.

Für die Erstellung von Karten im Maßstab 1 : 25000 - einem für stadtklimatologische Untersuchungen gebräuchlichen Maßstab - hat sich die Berechnung von 1 ha-Rastertemperaturen bewährt. Wesentlich kleinere Raster (20 m × 20 m) liefern erst bei größermaßstäbigen Darstellungen (etwa ab 1 : 10000) interpretationsfähige Ergebnisse, während extrem große Raster (500 m × 500 m) für Maßstäbe kleiner 1 : 25000 geeignet

erscheinen. Insbesondere bei der Berechnung der Temperaturwerte größerer Raster ist die Einführung von Rasterüberlappungen vorteilhaft, um feinere Abstufungen des Temperaturfeldes zu erfassen.

Abbildung 25: Untersuchungsgebiet 2; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert
- Nachts; 100 m Rasterkantenlänge, 60 m Überlappung

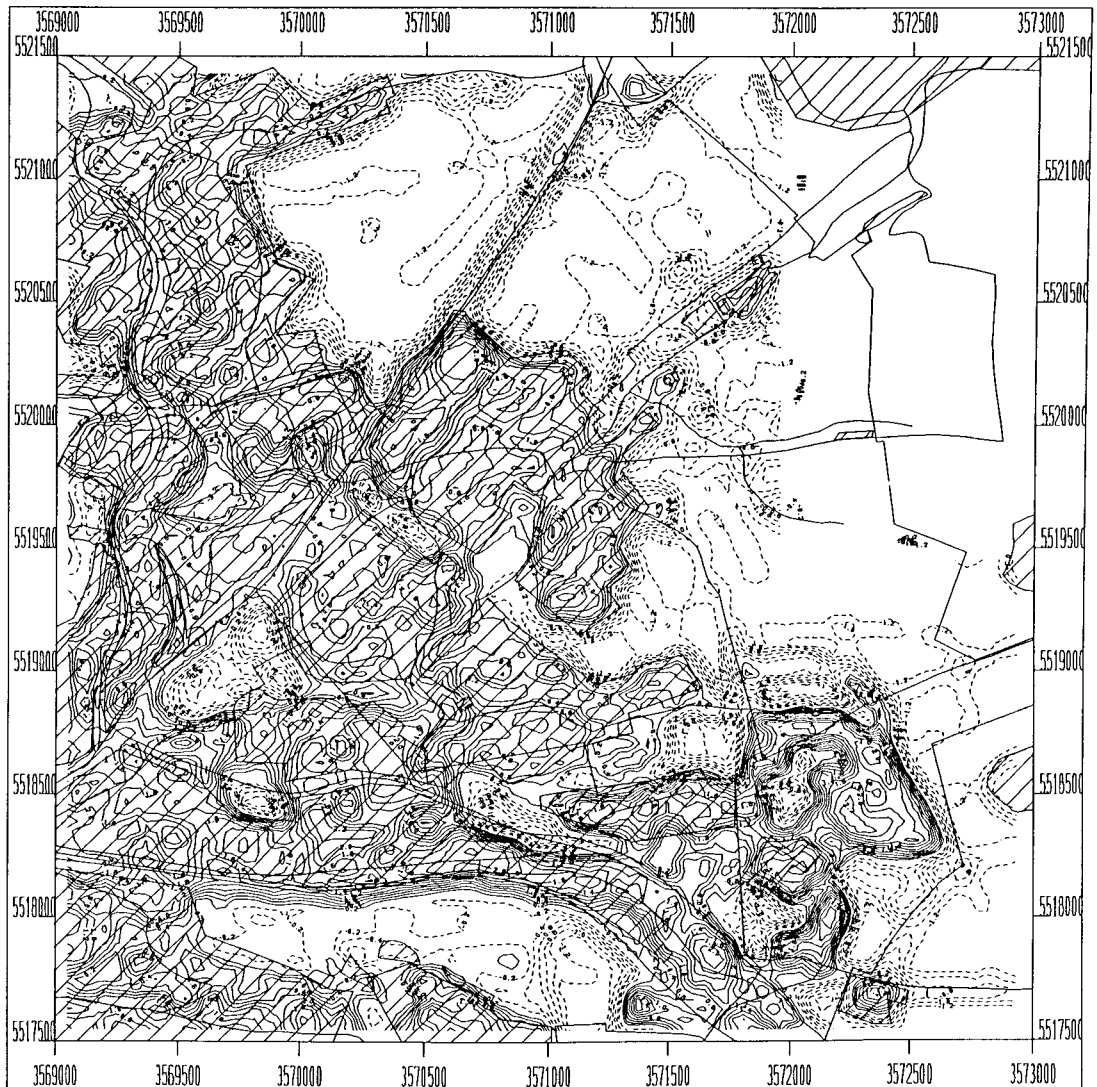


Abbildung 26: Untersuchungsgebiet 2; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert
- Nachts; 200 m Rasterkantenlänge, 120 m Überlappung

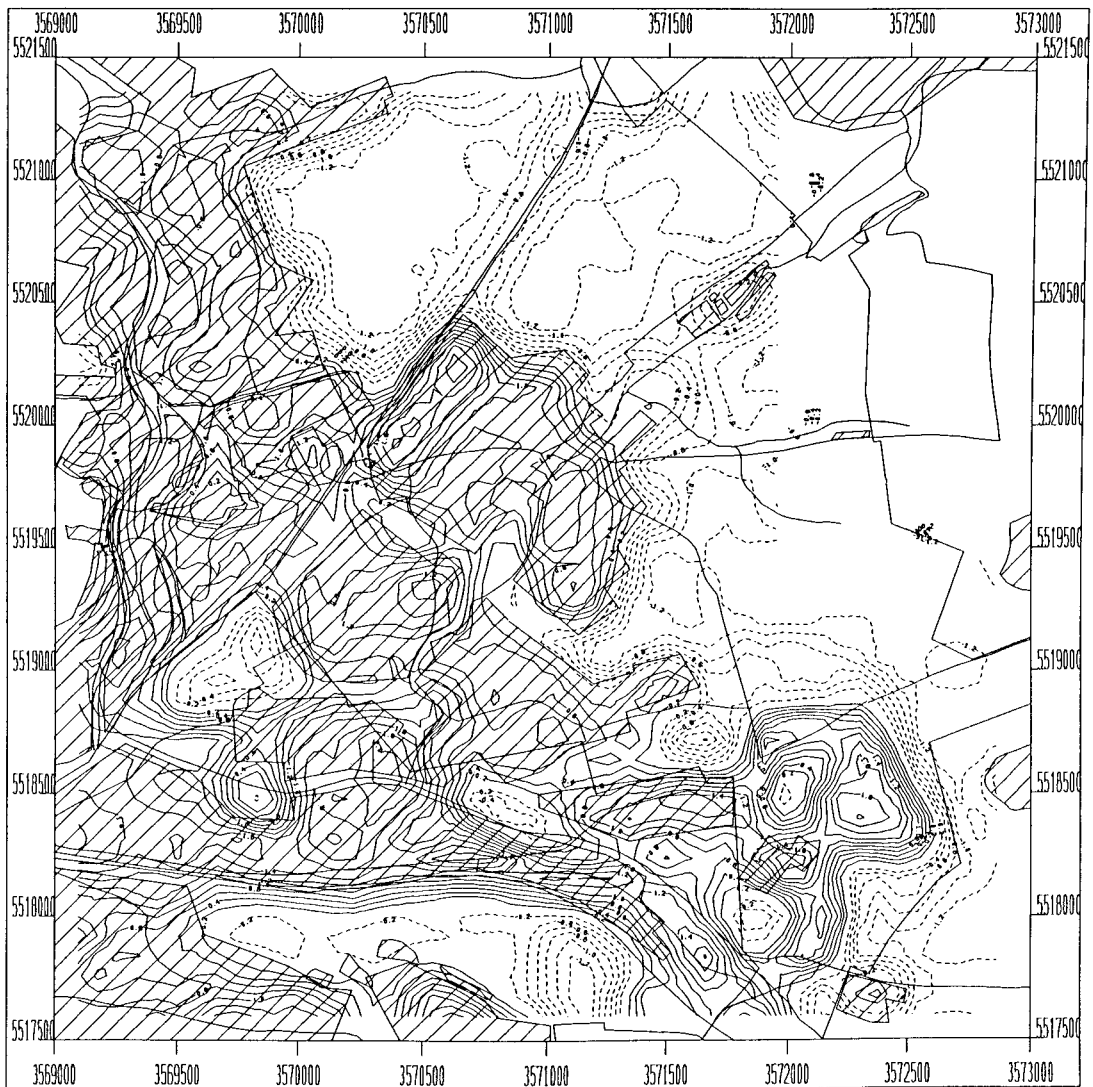
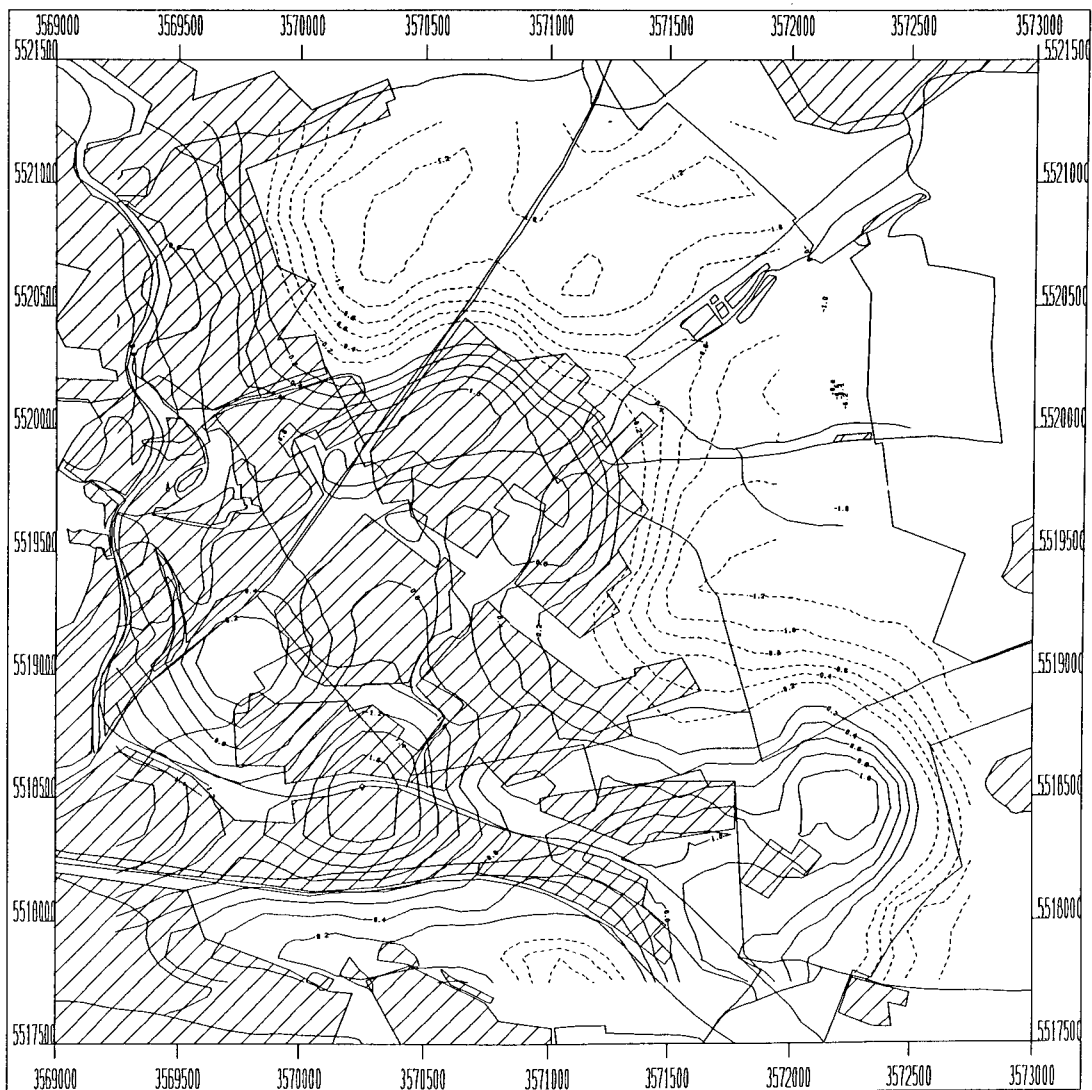


Abbildung 27: Untersuchungsgebiet 2; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert
- Nachts; 500 m Rasterkantenlänge, 400 m Überlappung



6.3 Neue Ansätze zur Berechnung der rasterbezogenen Temperaturwerte

Bisher erfolgte die Berechnung der rasterbezogenen Temperaturwerte unter der Annahme, daß die Temperatur über einer Fläche nur von dem auf dieser Fläche ausgebildeten Oberflächenmosaik abhängig ist (Bildung des gewichteten Mittelwertes aus den oberflächentypischen Temperaturwerten) und daß von der Umgebung der Rasterfläche kein modifizierender Einfluß ausgeht. In der Realität ist aber durchaus ein Zusammenhang zwischen der über einer Fläche herrschenden Lufttemperatur und der Gestaltung der benachbarten Oberflächen festzustellen.

Insbesondere die positive, weil klimamildernde, Wirkung von natürlichen Oberflächen (vor allem Baumbestände) auf ihre Umgebung wird in der Literatur immer wieder angesprochen; welches Ausmaß dieser Einfluß erreicht und bis zu welcher horizontalen Distanz er wirksam ist, ist aber stark umstritten.

FEZER (1976) zeigt anhand von Meßergebnissen aus Heidelberg, daß mit zunehmender Grünflächengröße die Lufttemperaturen über diesen Flächen abnehmen und gleichzeitig die thermische Differenz zu, in 250 m Entfernung liegenden, stark versiegelten und bebauten Bereichen zunimmt (Tabelle 12). FEZER (1976) folgert daraus: "Je größer also eine Grünfläche ist, umso mehr setzt sie sich gegen die Baumassen durch und nimmt Freilandklima an, umso weiter stadtwärts verbessert sie auch Straßen- und Hofklima."

Auch JACOBET (1986: 63 ff.) stellt eine wechselseitige Beeinflussung von künstlichen und natürlichen Oberflächen, sowohl im thermischen als auch im hygrischen Verhalten, fest. So wiesen in Augsburg Grünflächen im locker bebauten Stadtrandbereich um etwa 1 °C kühlere und 1 - 2 % (relativer Luftfeuchtigkeit) feuchtere Bedingungen als, im Stadtkern gelegene, Vergleichsflächen auf. DITTMANN (1982: 78 ff.) betont, daß der temperaturmindernde Einfluß von Vegetationsoberflächen stark von der Vegetationsform abhängig ist; während Baumbestände auf benachbarte versiegelte und bebaute Bereiche abkühlend wirken, werden die Temperaturen über Rasenflächen von ebensolchen Oberflächen erhöht. Die Klimawirksamkeit von Grünflächen ist also als eine Funktion ihrer Ausdehnung und der Vegetationsart aufzufassen (GEHRKE 1982: 44).

Tabelle 12: Lufttemperaturen über Grünflächen verschiedener Größe
(aus FEZER 1976)

Fläche (ha)	Lufttemperatur (°C) Parkmitte	Differenz zu städtischer Fläche (°C)
250	17.0	3.0
50	18.0	2.5
12	18.9	1.5
3.6	19.6	1.4
1.5	21.5	1.0
0.5	21.8	1.0
0.2	24.0	0.5

Wie weit reichen diese temperaturmodifizierenden Einflüsse einer Oberfläche auf ihre Umgebung?

FINKE (1978): "Die Fähigkeit, die Luftfeuchte zu erhöhen und die Temperatur zu erniedrigen, ist im wesentlichen auf die Grünfläche selbst beschränkt - ein aktiver ökologischer Ausgleich in der Art, daß die nähere oder gar weitere Umgebung positiv beeinflußt werden, ist weder meßtechnisch nachweisbar noch theoretisch zu erwarten."

In anderen Arbeiten wird zwar eine gegenseitige Beeinflussung angenommen, diese wird aber meist, bezüglich ihrer horizontalen Reichweite, eher gering eingeschätzt (BAUMGARTNER et al. 1986: 229; HORBERT u. KIRCHGEORG 1980; KATZSCHNER 1986; WILMERS 1988).

Von einer weitreichenden Einflußnahme der Grünflächen auf die thermischen Zustände in ihrer Nachbarschaft geht hingegen FLEMMING (1990: 107) aus - "Die seitliche Reichweite der abendlichen Temperatursenkung ist dem Logarithmus der Grünflächengröße proportional und kann mehrere 100 m erreichen." - allerdings ohne Beispiele zu nennen. Die von mir am 21.07.1995 durchgeführten Messungen zeigen deutlich, daß die oberflächenspezifischen Lufttemperaturen in Abhängigkeit von Größe und Standortumgebung, innerhalb eines Wertintervalls, stark variieren (Tabelle 8).

In Tabelle 13 wurden für jede Oberflächenart die jeweils niedrigste und höchste gemessene Lufttemperatur gegenübergestellt. Die jeweiligen Meßstandorte sind dabei zu allen drei Tageszeiten die gleichen.

Innerhalb der Klasse der natürlichen Oberflächen wurden die Minimaltemperaturen über den größten, homogenst gestalteten Flächen, die Maximaltemperaturen über Flächen inmitten stark versiegelter und bebauter Umgebung gemessen. Für die künstlichen Oberflächen lassen sich keine eindeutigen Zusammenhänge nachweisen, zumindest für den, im folgenden behandelten, Nachttermin gilt jedoch, daß die höchsten Temperaturen an den am großflächigsten und intensivsten von künstlichen Oberflächen geprägten Standorten herrschen.

Tabelle 13: Minimal- und Maximaltemperaturen (°C) über verschiedenen Oberflächen (21.07.1995)

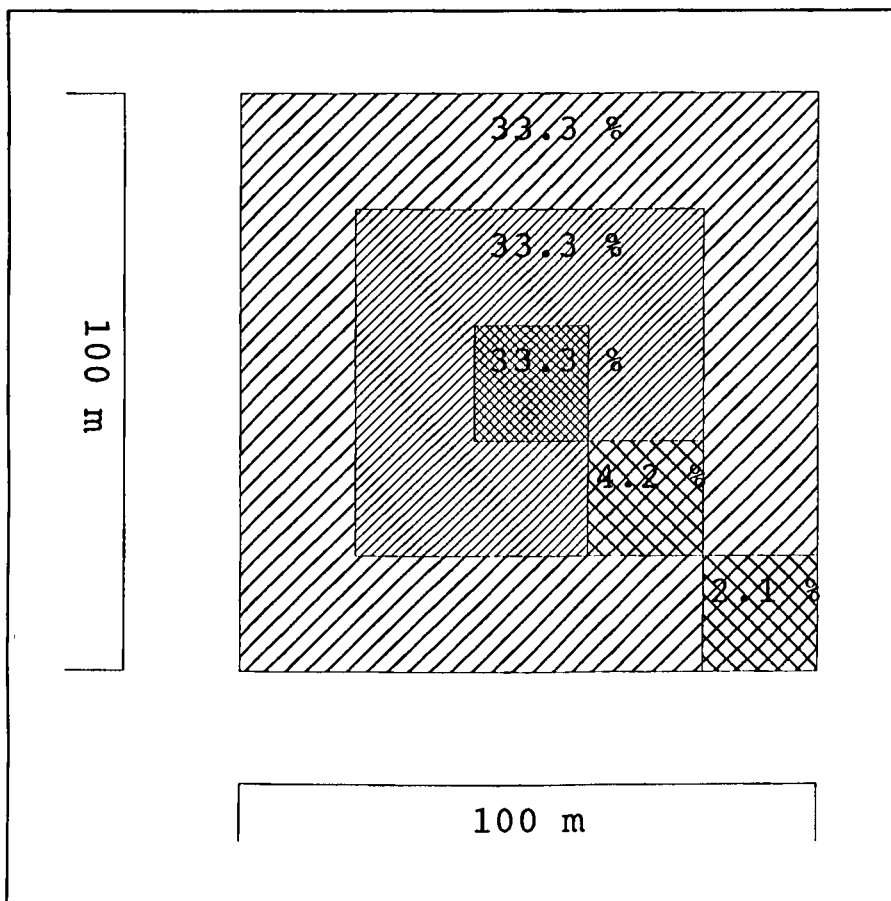
Oberfläche	Morgens		Mittags		Nachts	
Wiese	15.4	18.4	31.7	32.8	24.9	28.0
Gebüsch	14.9	18.7	31.4	32.9	23.5	27.6
Wald	15.8	18.2	31.0	32.1	25.1	27.2
Wasser	17.0	18.8	29.7	31.8	25.2	29.3
Acker	15.0	17.3	33.6	33.7	24.1	26.7
Versiegelte Fl.	18.4	19.2	32.4	33.1	28.5	29.3
Niedrige Beb.	16.7	16.8	32.4	32.4	26.6	27.5
Hohe Bebauung	17.8	19.8	29.1	32.8	27.6	30.2

Für die nachfolgend vorgestellten neuen, modellhaften Berechnungsansätze zur Abschätzung der Lufttemperatur über verschiedenen Oberflächen, gehe ich von folgenden vereinfachenden, auf die Literaturlauswertung und eigene Messungen gestützte, Annahmen aus.

- Das thermische Milieu über einer Fläche wird, mit zunehmender horizontaler Entfernung in abnehmendem Maße, von den umgebenden Oberflächen aktiv mitgestaltet (Ansatz 1).
- Die Lufttemperatur über natürlichen / künstlichen Oberflächen ist umso höher / niedriger, je kleiner und inhomogener - das heißt von künstlichen / natürlichen Oberflächen umgeben oder durchsetzt - die betrachtete Fläche ist (Ansatz 2).

Die Berechnungen erfolgen für 20 m × 20 m-Raster unter Einbeziehung der umliegenden,

Abbildung 28: Gewichtungsfaktoren unterschiedlich weit vom Zentralraster entfernter Raster



innerhalb eines zu definierenden Umgebungsrasters gelegenen, Raster. Als Vergleichsbasis ist in Abbildung 29 ein Ausschnitt aus dem auf $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ -Rasterbasis, nach dem in 5 erläuterten Berechnungsmodus, ermittelten Temperaturfeld dargestellt.

In einem ersten Ansatz wird die Temperatur eines jeden $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ -Rasters aus allen $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ -Rastern eines übergeordneten Rasters berechnet. Das zentrale Raster trägt dabei am stärksten zum endgültigen Temperaturwert bei; mit zunehmender Entfernung nimmt der Einfluß stark ab. Ich lege dabei die Annahme zugrunde, daß jeweils die Gesamtheit der, in gleicher Entfernung²² vom zentralen Raster liegenden, Raster den gleichen Anteil an der Temperaturgestaltung über dem zentralen Raster hat. Das heißt bei Einbeziehung eines 1 ha-Rasters geht das zentrale Raster mit $33,3 / 1 = 33,3\%$, die 20 m entfernten Raster mit jeweils $33,3 / 8 = 4,2\%$ und die 40 m entfernten Raster mit $33,3 / 16 = 2,1\%$ in die Berechnung ein (siehe Abbildung 28).

Mit dem zweiten Ansatz wird für jedes $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ -Raster das Verhältnis von natürlichen zu künstlichen Oberflächen in der Umgebung (übergeordnetes Raster variabler Größe) ermittelt. Ein Wert von 100 bedeutet, daß die gesamte Fläche - einschließlich des zentralen Rasters - aus natürlichen Oberflächen besteht, der Wert Null, daß nur künstliche Oberflächen vertreten sind. Man erhält damit eine abschätzende Vorstellung von Größe und Homogenität der Fläche, innerhalb derer sich das zu berechnende Raster befindet. Die Berechnung dieses "Homogenitätsfaktors" erfolgt entsprechend dem in Abbildung 28 dargestellten Schema, das heißt, eine weiter vom zentralen Raster entfernte Fläche verstärkt oder verringert die Grünflächenhomogenität in geringerem Maße als eine unmittelbar benachbarte Fläche.

Die im zentralen Raster vertretenen Oberflächen bekommen nun, je nach Homogenitätsfaktor, einen Wert aus dem oberflächenspezifischen Wertintervall zwischen Maximal- und Minimaltemperatur zugewiesen (Tabelle 13).

²² Die entlang der Diagonalen liegenden Raster sind natürlich jeweils etwas weiter vom zentralen Raster entfernt als die in den Hauptwindrichtungen anschließenden Raster.

Ein Beispiel soll diesen Berechnungsmodus veranschaulichen:

Das zentrale Raster weise diese Oberflächenstruktur auf:

Wiese	50 %
Gebüsch	20 %
Wald	20 %
Versiegelte Fläche	10 %

Als Homogenitätsfaktor wurden für das übergeordnete 1 ha-Raster 70 % ermittelt. Daraus ergeben sich als oberflächenspezifische Temperaturwerte:

Wiese	$28.0 - (0.7 \times 3.1) \text{ °C} = 25.8 \text{ °C}$
Gebüsch	$27.6 - (0.7 \times 4.1) \text{ °C} = 24.7 \text{ °C}$
Wald	$27.2 - (0.7 \times 2.1) \text{ °C} = 25.7 \text{ °C}$
Versiegelte Fläche	$29.3 - (0.7 \times 0.8) \text{ °C} = 28.7 \text{ °C}$

Der endgültige Temperaturwert des Zentralrasters ist der gewichtete Mittelwert der oberflächenspezifischen Temperaturen:

$$T = (0.5 \times 25.8 + 0.2 \times 24.7 + 0.2 \times 25.7 + 0.1 \times 28.7) \text{ °C}$$

$$T = 25.9 \text{ °C}$$

In den Abbildungen 30 - 33 sind einige Ergebnisse der beschriebenen Temperaturabschätzungen dargestellt.

Gegenüber der bisherigen Berechnungsweise (Abbildung 29) zeigen die Ergebnisse der Variante 1 (Abbildungen 30 und 32) ausgeglichene thermische Verhältnisse. Inmitten großflächiger Areale natürlicher oder künstlicher Oberflächen fallen die Veränderungen gegenüber Abbildung 29 gering aus (Ausschnitte A, B, C), während kleinere isolierte Flächen durch die nun berücksichtigte Beeinflussung durch benachbarte Bereiche nurmehr in sehr abgeschwächter Form als thermische Anomaliebereiche auffallen (Ausschnitte D, E). Mit zunehmender Größe des Umgebungsrasters wird dieser Effekt verstärkt, das heißt,

Abbildung 29: Untersuchungsgebiet 2; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert
- Nachts; 20 m Rasterkantenlänge

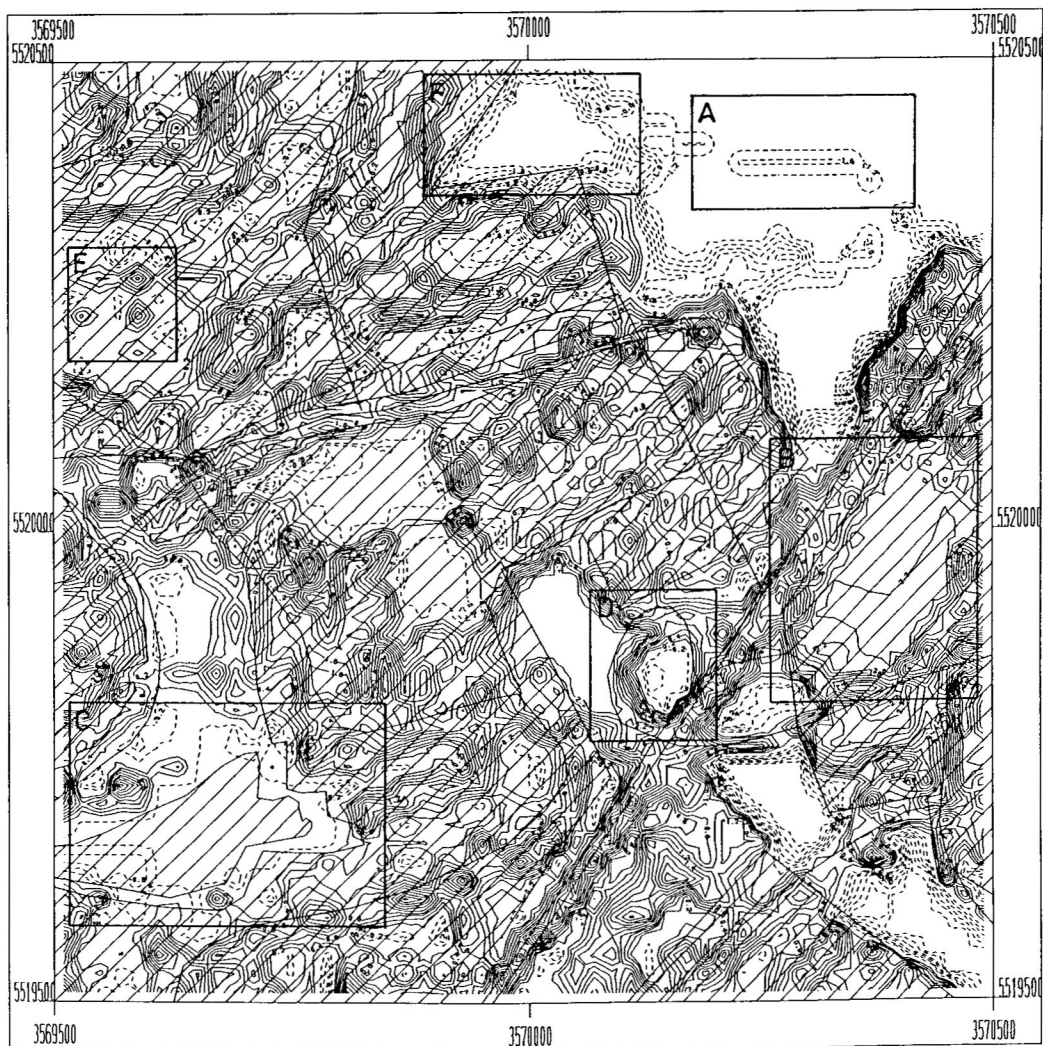


Abbildung 30: Untersuchungsgebiet 2; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert
- Nachts; 20 m Rasterkantenlänge, 1 ha-Umgebungsraaster; Berechnungsvariante 1

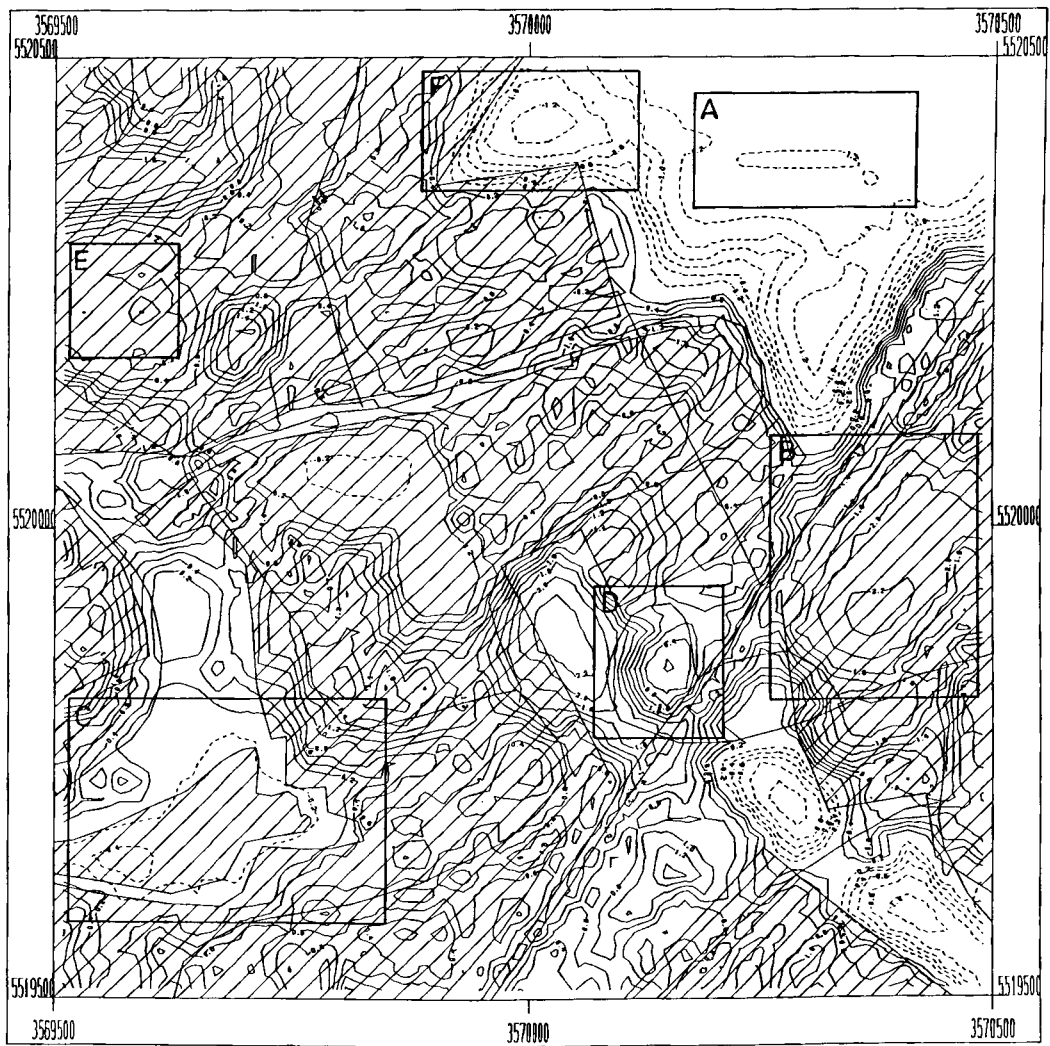


Abbildung 31: Untersuchungsgebiet 2; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert
- Nachts; 20 m Rasterkantenlänge, 1 ha-Umgebungsraster; Berechnungsvariante 2

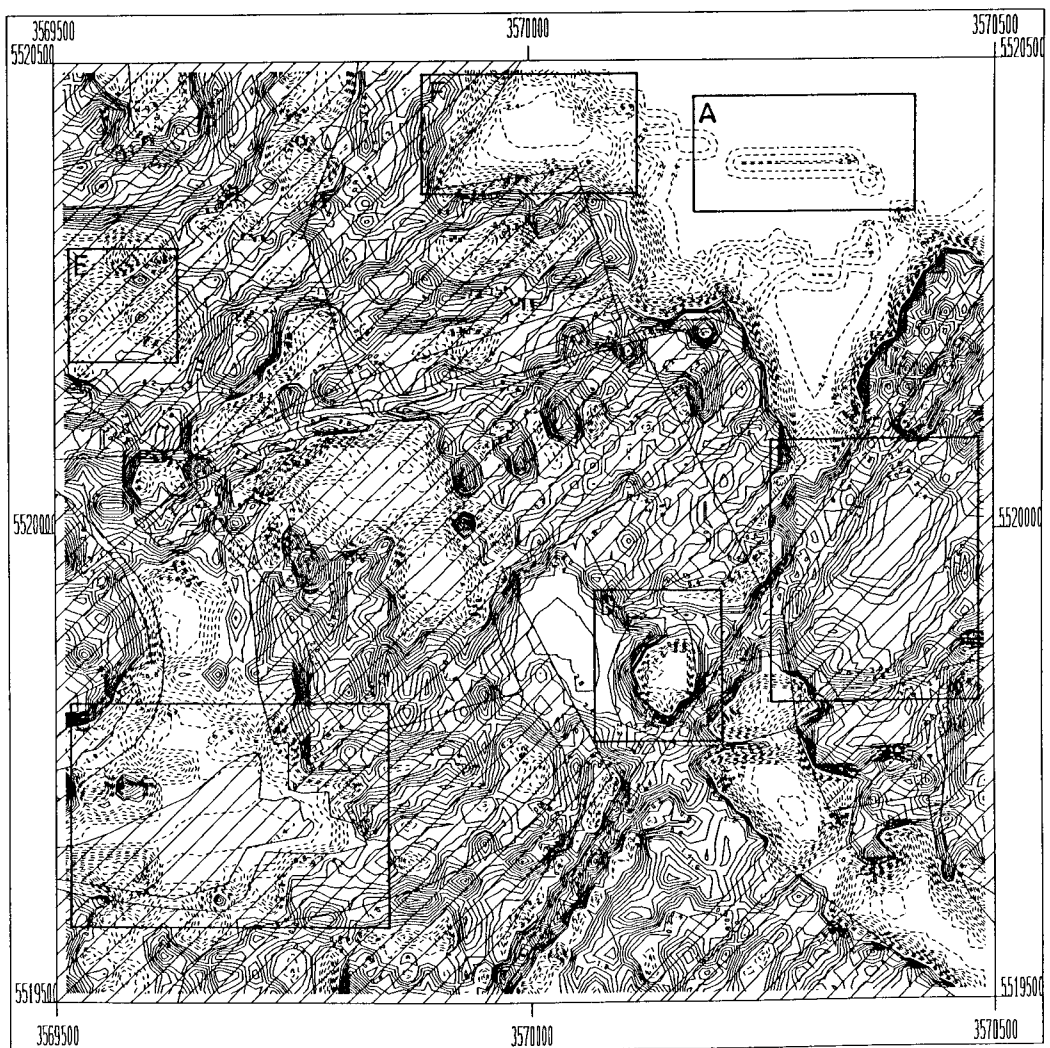


Abbildung 32: Untersuchungsgebiet 2; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert
- Nachts; 20 m Rasterkantenlänge, $220 \times 220 \text{ m}^2$ -Umgebungsraaster; Berechnungs-
variante 1

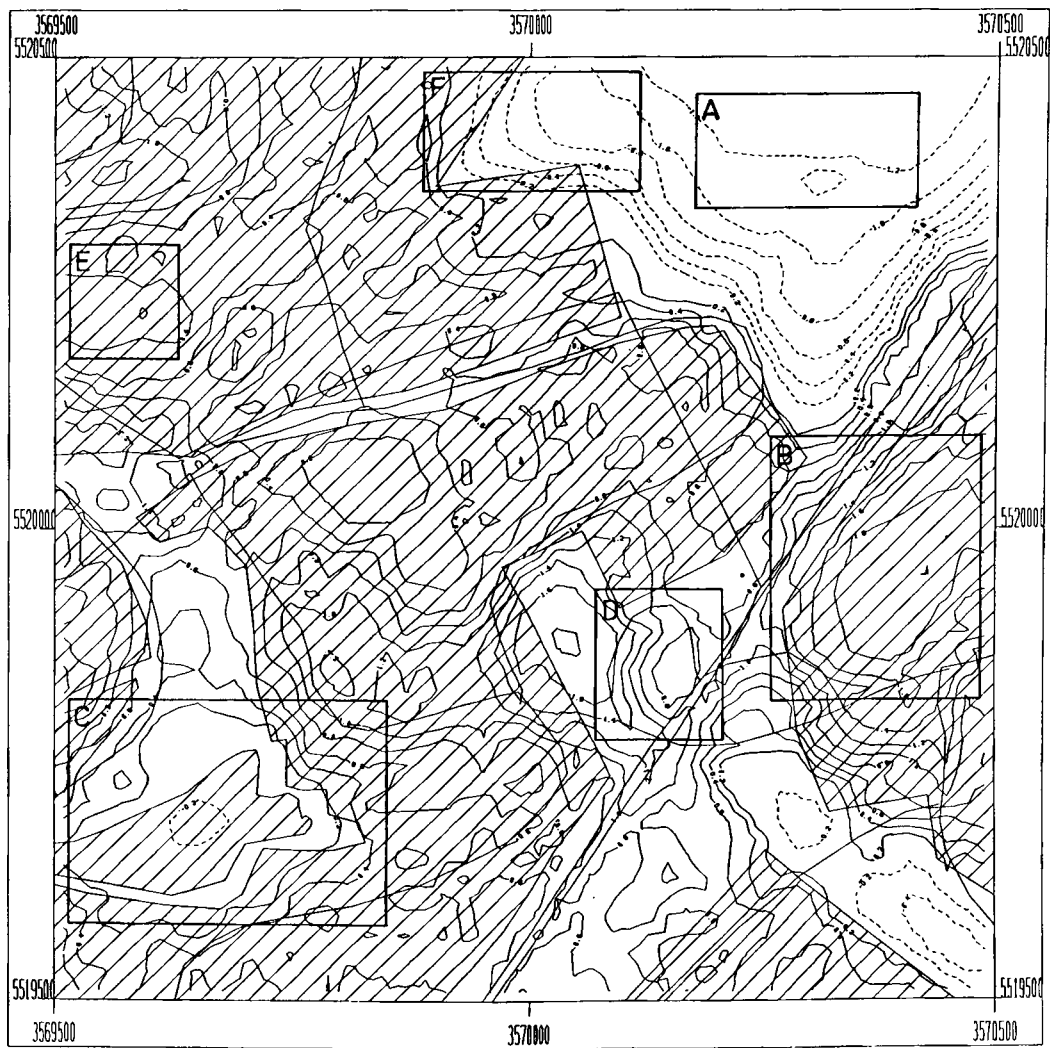
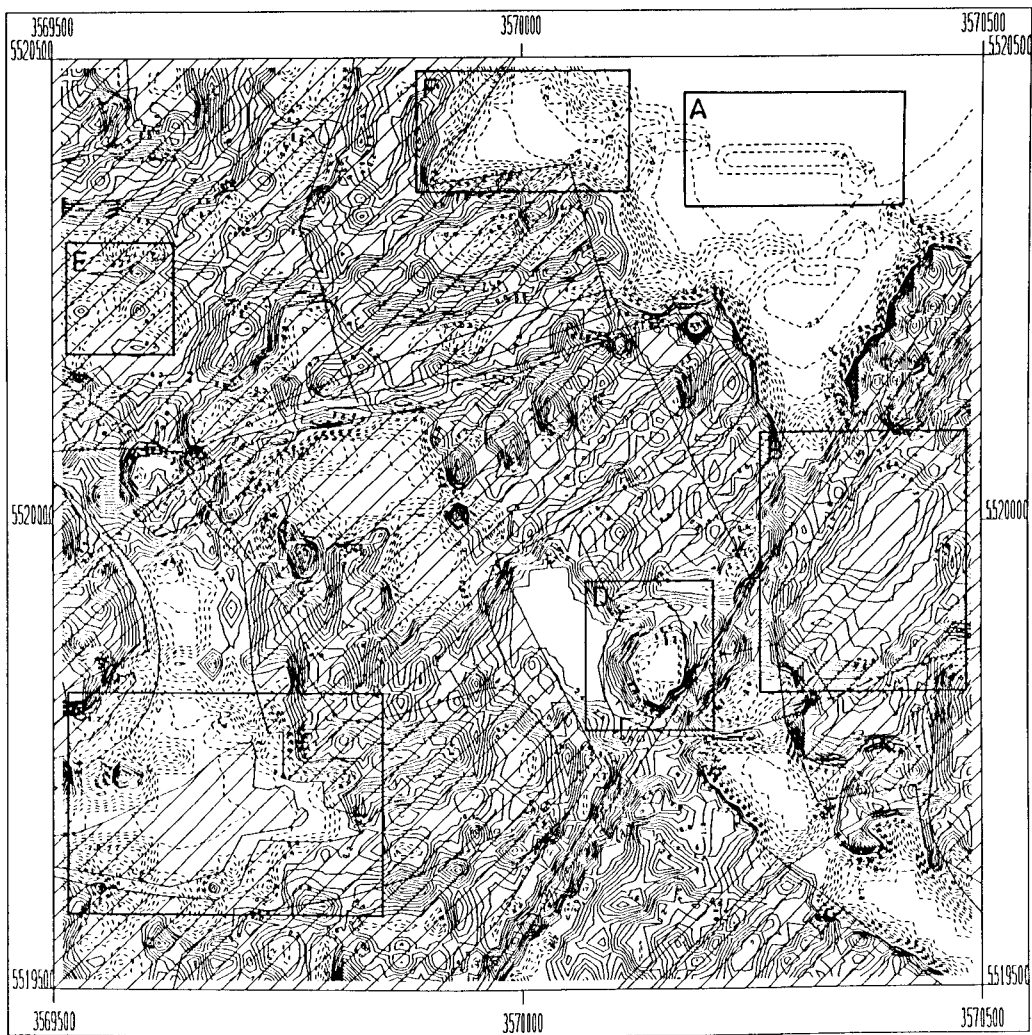


Abbildung 33: Untersuchungsgebiet 2; Abweichungen der Temperatur vom Mittelwert - Nachts; 20 m Rasterkantenlänge, $220 \times 220 \text{ m}^2$ -Umgebungsrastrer; Berechnungsvariante 2



auch größere homogene Flächen werden in ihrem thermischen Verhalten stark durch angrenzende Bereiche anderer Oberflächencharakteristik modifiziert. So ist über bewaldeten und landwirtschaftlich genutzten Oberflächen eine deutliche Erhöhung der Temperatur durch benachbarte versiegelte und bebaute Flächen zu verzeichnen (Ausschnitte C, F).

Die Abbildungen 31 und 33 illustrieren die Resultate der Temperaturberechnung unter Verwendung der zweiten Berechnungsvariante. Betrachtet man zunächst nur die Isolinienvverläufe - ohne Berücksichtigung der Temperaturwerte, so fallen im Vergleich zu Abbildung 29 nur geringe Unterschiede auf. Starke Abweichungen sind aber bezüglich der Variationsbreite der Temperaturen festzustellen. Auch hier sind sehr homogen gestaltete natürliche / künstliche Oberflächen durch extrem niedrige / hohe Temperaturen (Ausschnitte A, B, C) ausgezeichnet, kleine Areale weisen dagegen Werte vom anderen Ende des jeweiligen Temperaturintervalls auf. Infolge der weiten Streuung der oberflächenspezifischen Temperaturwerte (Tabelle 13) bestehen aber bedeutend ausgeprägtere Gegensätze zwischen verschiedenen strukturierten Oberflächen und folglich auch höhere Temperaturgradienten, die in den Abbildungen durch dichte Isothermenscharung visualisiert werden. Eine Vergrößerung der Umgebungsraster bewirkt, ebenso wie bei Variante 1, in den meisten Fällen eine Minderung der Extremwerte (Ausschnitte B, C), in einigen Fällen erhalten kleinere Flächen aber durch die Einbeziehung entfernter liegender Bereiche mit entsprechender Oberflächenbedeckung extremere Werte (Ausschnitt E).

Die vorgestellten neuentwickelten Berechnungsansätze stellen selbstverständlich noch keine wissenschaftlich gesicherten Modellentwicklungen dar, sie sind vielmehr als praktische Umsetzungen erster Überlegungen zur Optimierung des, in dieser Arbeit verwendeten, Stadtklimamodells zu verstehen.

Um die Temperaturmodellierung auf Basis der beiden Modellvarianten weiter zu verbessern wären folgende ergänzende Arbeiten durchzuführen:

- Durchführung und Auswertung detaillierter Messungen zum klimatischen insbesondere thermischen Verhalten verschiedener Oberflächen unter Berücksichtigung der spezifischen Standortbedingungen, zur Bereitstellung einer soliden Datenbasis für die Modellentwicklung und -validierung.
- Darauf aufbauend die Modifikation, eventuell Neuformulierung, der beschriebenen Berechnungsmodi.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Unter Zugrundelegung der Tatsache, daß verschiedene Oberflächenarten für sie typische Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse in der ihr auflagernden Luftschicht bewirken, wird, durch die EDV-gestützte Verknüpfung von rasterbezogenen Flächenbilanzdaten zweier Erhebungszeitpunkte (1983 und 1994) mit Ergebnissen der Messung der tageszeitlich variierenden oberflächenspezifischen thermischen und hygrischen Zustände in 2 m Höhe, das Ziel angestrebt ein raum-zeitlich differenziertes Bild der klimamodifizierenden Auswirkungen von Oberflächenveränderungen in zwei ausgewählten Stadtteilen von Würzburg (Heuchelhof - Rottenbauer und Lengfeld) zu erhalten.

In einem ersten Arbeitsschritt wird auf der Basis von Color-Luftbildern im Maßstab 1:5500 eine räumlich und inhaltlich hochauflösende (Feststellung der prozentualen Flächenanteile acht verschiedener Oberflächenarten auf 20 m × 20 m-Raster-Basis) Flächenbilanz der Untersuchungsgebiete durchgeführt. Der Vergleich dieser mit einer bereits 1983 - für das gesamte Stadtgebiet auf 1 ha-Raster-Basis mit der Unterscheidung von drei Oberflächenarten - erstellten Flächenbilanz zeigt im Ergebnis in beiden Stadtteilen deutliche Anteilsverschiebungen zugunsten der versiegelten und bebauten Flächen.

Im Sommer 1995 durchgeführte Messungen von Lufttemperatur und -feuchtigkeit geben Aufschluß über oberflächentypische Werte dieser beiden Klimaparameter zu drei Tageszeiten (Morgens, Mittags, Nachts). Die Meßergebnisse bestätigen das Resultat ähnlicher Untersuchungen, nämlich, daß über versiegelten Flächen in der Regel höhere Temperaturen als über nichtversiegelten Freiflächen herrschen. Gleichzeitig wird aber zum einen deutlich, daß die hygrischen Verhältnisse komplexeren Ursache-Wirkungs-Beziehungen unterliegen, die sich verallgemeinerbaren Erklärungsansätzen entziehen und zum anderen, daß die im Rahmen dieser Arbeit angewendete Flächenbilanzierungsmethode (weitergehende Differenzierung innerhalb der Oberflächenklassen Bebaute Flächen und Nichtversiegelte Freiflächen) angesichts der ausgeprägten Unterschiede im klimatischen Verhalten verschiedener nichtversiegelter bzw. bebauter Strukturen trotz des erhöhten Arbeitsaufwandes gerechtfertigt ist.

Die Berechnung der rasterbezogenen Temperatur- und Dampfdruckwerte erfolgt durch die Bildung des gewichteten Mittelwerts der oberflächenspezifischen Werte. Durch Subtraktion des für 1983 ermittelten von dem für 1994 berechneten Temperatur- bzw. Dampfdruckwert erhält man Aufschluß über Richtung und Ausmaß der infolge der Oberflächenveränderungen eingetretenen thermischen und hygrischen Veränderungen.

Die Schwerpunkte der Temperatur- und Dampfdruckänderungen, die in Karten im Maßstab 1 : 25000 in Isolinienform dargestellt sind, liegen in den Gebieten, in denen massive Umwandlungen natürlicher in künstliche Oberflächen stattfanden (Gewerbegebiete am Wöllrieder Hof und zwischen Heuchelhof und Rottenbauer, Wohngebietserweiterungen am Heuchelhof), hier werden auch die maximalen Änderungen festgestellt (maximale Temperaturzunahme: 2,3 °C; maximale Dampfdruckabnahme: -1,6 hPa). Diese Ergebnisse werden unter Berücksichtigung ihrer - methodenbedingt - eingeschränkten Aussagekraft (Durchführung des Vergleichs auf Basis von drei Oberflächenarten) bezüglich ihrer bioklimatologischen Bedeutung interpretiert.

Auf der Basis der Flächenbilanzdaten 1994 werden anschließend einige methodische Erweiterungen (Variationen der Rastergrößen, Einführung von Rasterüberlappungen und neuen Berechnungsansätzen) des verwendeten Stadtklimamodells erarbeitet und kritisch beurteilt. Es zeigt sich, daß für die Bearbeitung unterschiedlicher Fragestellungen und für die kartographische Darstellung in verschiedenen Maßstabsbereichen unterschiedliche Rastergrößen empfohlen werden können, wobei die Einführung von Rasterüberlappungen geeignet erscheint die Darstellung auf Basis größerer Raster zu optimieren. Eine Validierung und Verbesserung der neuentwickelten Berechnungsansätze zur Ermittlung der rasterbezogenen Temperaturwerte setzt die Bereitstellung einer verbesserten Datenbasis, die Aufschluß über standortabhängige Variabilitäten oberflächenspezifischer Temperaturwerte gibt, voraus. Detaillierte Messungen könnten wichtige Hinweise geben ob und in welcher Weise funktionale Zusammenhänge zwischen oberflächenspezifischer Temperatur und Größe bzw. Homogenität der Fläche sowie der Standortumgebung bestehen. Unter Verwendung dieser Ergebnisse könnte eine Optimierung, eine Neuformulierung oder aber, falls sich keine nachvollziehbaren Zusammenhänge feststellen lassen, eine Verwerfung der Berechnungsansätze erfolgen.

Insgesamt hat sich gezeigt, daß die verwendete Methode der Verknüpfung von Oberflächen- und Klimaparametern durchaus dazu geeignet ist, abschätzende Darstellungen der raum-zeitlich differenzierten thermischen und hygrischen Situation zu erarbeiten. In verstärktem Maße gilt dies bei Verwendung der verbesserten Version der Flächenbilanz, wie sie im Rahmen dieser Arbeit erstellt wurde.

Als wesentliche Vorteile gegenüber anderen stadtklimatologischen Arbeitsmethoden beispielsweise der sehr aufwendigen Infrarot-Thermographie, sind der relativ geringe finanzielle und arbeitstechnische Aufwand der beschriebenen Methode, die in jeder Stadt, für die eine Luftbildbefliegung vorliegt angewandt werden kann sowie die Berücksichtigung der bioklimatologisch bedeutsamen thermischen und hygrischen Situation, was eine planungsbezogene Interpretation der Ergebnisse ermöglicht, zu nennen.

Aufgrund der Möglichkeit wesentliche Klimaparameter in ihrer flächenbezogenen Differenzierung darzustellen, ist diese Methode in hohem Maße für den Einsatz in der stadtplanerischen Praxis geeignet, die ja einen Flächenbezug klimatologischer Aussagen fordert (BECKRÖGE u. STOCK 1988). Auch die von ALEXANDER (1994), für den Einsatz im Rahmen von Umwelt-Verträglichkeits-Prüfungen von klimatologischen Methoden, geforderte Eignung zur Simulation der klimatischen Auswirkungen von Nutzungsänderungen besitzt die verwendete Methode. Durch den Vergleich der aktuellen klimatischen Verhältnisse mit den, auf Basis einer simulierten Flächenbilanz, ermittelten Zustände lassen sich die klimatischen Veränderungen abschätzen (analog zu dem in dieser Arbeit durchgeführten Vergleich). Die in 6 vorgestellten Variationen und methodischen Erweiterungen bieten dabei die Möglichkeit unterschiedliche, insbesondere bezüglich der gewünschten räumlichen Auflösung verschiedene, Fragestellungen in adäquater Weise zu bearbeiten. Darüberhinaus besteht die auch von HASE (1990) angesprochene Möglichkeit durch die Kombination mit ergänzenden Datensätzen synthetische Klimafunktionskarten zu erarbeiten.

Mit Blick auf die in dieser Arbeit behandelten Würzburger Stadtteile ist eine kontinuierliche Aktualisierung der Flächenbilanz und ein Einsatz des vorgestellten Stadtklimamodells in der stadtplanerischen Praxis anzuregen. Eine Simulation der klimatischen Auswirkungen verschiedener Planungsalternativen der in 3.4.2 angesprochenen Bauvorhaben, könnte

wertvolle Hinweise für - auch unter bioklimatologischen Aspekten - vernünftige stadtplanerische Entscheidungen liefern.

Anhang

A - Tabellen

Tabelle 5: Ergebnisse der Meßfahrten vom 30.06.1995

Meßfahrten am 30.06.1995											
Nr	Meßstandort	OF	Morgens			Mittags			Nachts		
			Zeit	T (°C)	RH (%)	Zeit	T (°C)	RH (%)	Zeit	T (°C)	RH (%)
1	Straßburger Ring / Heuchelhofstr.	1	03.45	16.2	76.7	13.00	28.6	30.0	21.37	23.9	47.0
2	Luxemburger Str. / Parkplatz	6	03.49	17.7	70.4	13.04	30.3	26.2	21.40	24.9	42.1
3	Luxemburger Str.	8	03.51	17.8	71.4	13.05	29.4	26.5	21.43	24.5	42.1
4	Bonner Str.	8	03.55	17.3	70.1	13.10	28.6	31.0	21.47	24.6	44.6
5	Berner Str.	3	03.58	15.9	74.0	13.14	29.3	27.8	21.52	22.5	52.1
6	Berner Str.	8	04.01	16.4	71.1	13.17	30.1	26.6	21.56	23.7	52.1
7	Berner Str.	4	04.04	14.7	86.4	13.20	29.0	37.3	22.00	21.6	68.7
8	Miletweg	7	04.07	15.3	76.3	13.23	30.5	28.5	22.04	22.8	56.9
9	Pergamonweg	3	04.10	14.3	81.4	13.26	28.1	39.0	22.06	21.5	61.7
10	Olympiapromenade	3	04.13	14.4	79.5	13.29	28.4	30.6	22.11	20.8	66.8
11	Spartaweg	2	04.17	13.2	85.6	13.32	29.6	30.7	22.16	18.9	75.6
12	Stauffenbergstr.	5	04.23	13.9	82.9	13.37	31.2	26.8	22.23	20.5	67.0
13	Stauffenbergstr.	5	04.25	13.6	85.6	13.39	30.5	26.3	22.26	19.7	69.0
14	Stauffenbergstr.	2	04.27	13.4	87.0	13.41	29.0	32.0	22.28	19.0	72.3
15	Rottenbauer - Zehnt- gasse	7	04.30	15.6	73.9	13.45	30.6	26.5	22.32	22.3	58.8
16	Delpstr.	6	04.34	15.5	76.8	13.50	31.7	25.7	22.36	23.0	54.7
17	Leuschnerstr.	6	04.36	15.1	79.0	13.52	30.9	25.4	22.38	22.7	55.8
18	Delpstr.	5	04.39	14.6	86.6	13.55	30.3	32.7	22.42	22.0	56.2
19	Delpstr.	1	04.44	13.5	87.0	13.58	29.9	28.0	22.44	21.5	59.0
20	Dundeestr.	7	04.48	15.7	78.7	14.05	30.8	26.7	22.50	23.7	49.5
21	Dundeestr.	1	04.51	13.8	86.4	14.07	29.9	29.0	22.53	22.7	49.2
22	Dundeestr.	2	04.55	12.4	91.0	14.09	30.0	34.0	22.55	20.8	56.4
1	Straßburger Ring / Heuchelhofstr.	1	05.00	13.6	87.2	14.16	29.8	27.0	23.00	22.4	54.8

Tabelle 6: Ergebnisse der Meßfahrten vom 21.07.1995

Meßfahrten am 21.07.1995											
Nr	Meßstandort	OF	Morgens			Mittags			Nachts		
			Zeit	T (°C)	RH (%)	Zeit	T (°C)	RH (%)	Zeit	T (°C)	RH (%)
1	Schwabenstraße	8	04.25	18.2	88.3	13.00	27.8	54.2	21.09	27.6	60.6
2	Peterstraße	8	04.30	20.3	79.5	13.05	31.5	44.0	21.10	30.3	49.9
3	Schwabenstraße	4	04.29	17.4	92.4	13.01	28.2	60.6	21.10	25.2	82.0
4	Unt. Johanniterg.	8	04.35	19.8	82.3	13.09	31.9	43.1	21.15	30.1	51.0
5	Continent / Parkplatz	6	04.35	19.2	81.6	13.08	33.4	37.0	21.15	29.0	52.9
6	Media-Markt / Park- platz	6	04.38	18.6	84.4	13.12	31.0	41.7	21.17	29.1	52.5
7	Mainkai	4	04.40	19.2	85.4	13.13	30.7	41.9	21.19	29.3	54.6
8	Am Schießgraben	5	04.43	17.6	90.0	13.15	32.2	41.9	21.21	26.4	66.0
9	Waidmannsteige	7	04.45	17.0	90.8	13.18	31.4	43.7	21.24	26.3	69.5
10	Yachtclub	4	04.45	18.9	86.6	13.17	31.1	42.0	21.24	27.7	62.4
11	Kürmachtalstraße	5	04.48	15.3	96.0	13.20	32.4	41.6	21.26	24.8	76.3
12	Scepfad	5	04.52	15.3	94.9	13.23	32.3	42.0	21.30	23.6	78.2
13	Ringpark	3	04.51	18.0	90.2	13.25	31.3	43.7	21.30	27.0	63.7
14	Herrnhofstraße	7	04.55	16.9	87.7	13.26	31.8	42.9	21.34	26.4	67.6
15	Ringpark	1	04.54	18.1	91.1	13.26	32.9	41.4	21.35	27.5	64.2
16	Kurze Gasse	7	04.57	17.0	87.0	13.28	31.5	43.0	21.36	27.2	64.3
17	Ringpark	2	04.58	18.3	90.3	13.30	33.2	45.4	21.39	27.5	62.8
18	Lengfeld / Sportplatz	1	05.01	16.6	92.7	13.31	31.3	44.4	21.41	23.6	82.4
19	Ringpark	3	05.03	18.4	89.2	13.34	31.6	43.1	21.43	26.9	62.7
20	Lengfeld / Sportplatz	2	05.03	15.0	96.6	13.34	30.7	57.7	21.44	22.8	86.1
21	Lengfeld / Sportplatz	2	05.04	15.4	95.3	13.35	32.3	49.7	21.45	23.2	84.4
22	Ringpark	2	05.09	18.8	90.1	13.37	32.5	46.6	21.46	27.2	65.9
23	Lengfeld / Sportplatz	1	05.06	15.5	96.0	13.36	31.1	44.3	21.47	24.2	77.5
24	Lengfeld / Sportplatz	3	05.08	16.4	93.3	13.38	31.0	45.9	21.50	24.7	77.8
25	Wiese hinter Reg. v. Ufr.	1	05.13	18.5	87.5	13.41	32.6	39.6	21.50	27.5	61.4
26	Reg. v. Ufr. / Parkplatz	6	05.15	19.3	84.8	13.44	33.0	38.3	21.52	28.0	59.0
27	Lengfeld / Sportplatz	3	05.10	15.9	94.0	13.41	30.7	45.3	21.53	24.4	79.7
28	Peterstraße	8	05.16	19.9	81.5	13.47	34.0	37.4	21.55	28.3	57.4
1	Schwabenstraße	8	05.17	17.7	88.2	13.48	29.4	47.2	22.00	26.4	64.6

B - Karten

(Karten 1 - 27; S. 86 - 112)

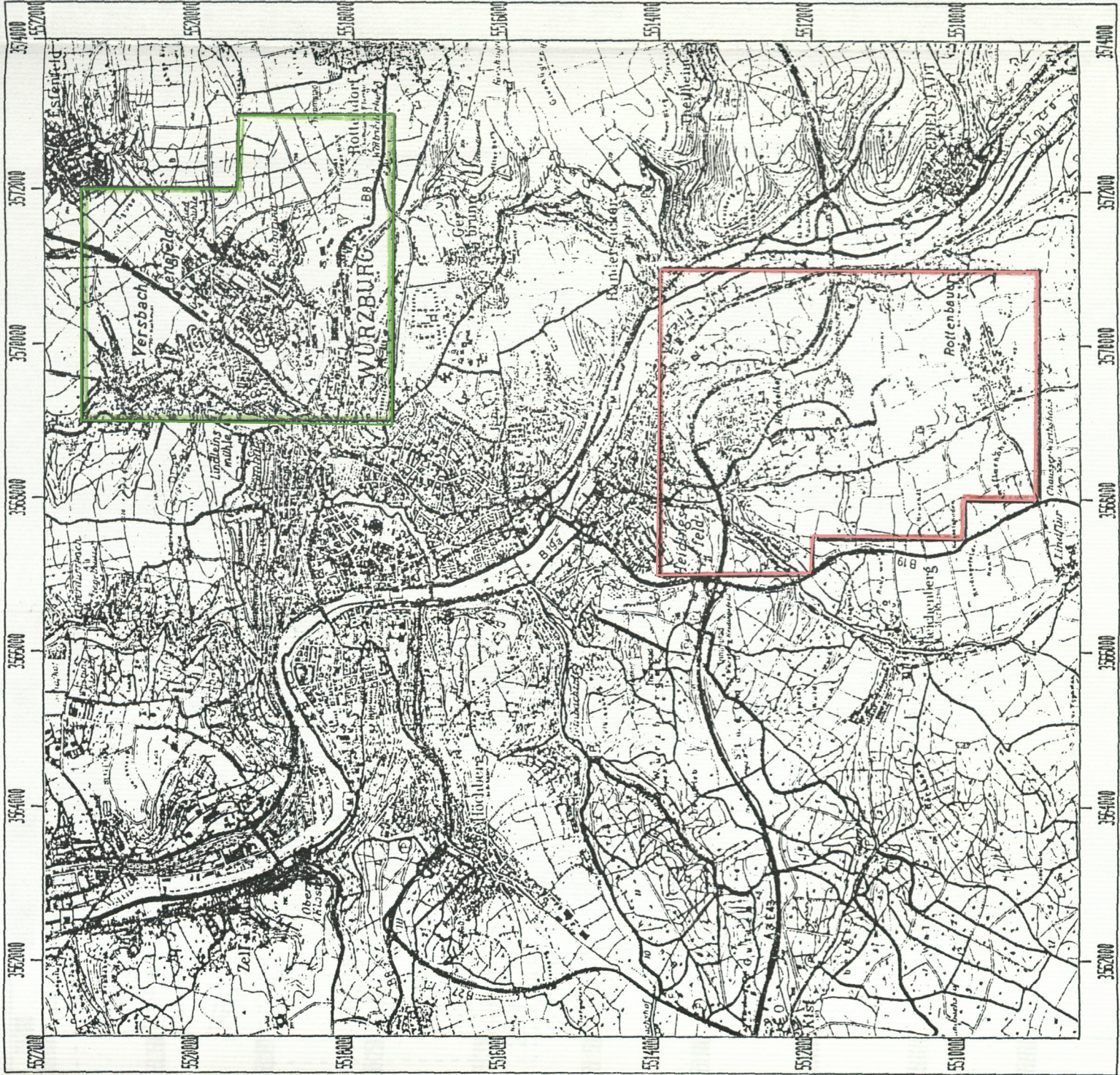
Lage der Untersuchungsgebiete

LEGENDE

- Untersuchungsgebiet 1 (Würzburg Heuchelhof-Rettenbauer)
- Untersuchungsgebiet 2 (Würzburg Lengfeld)

Kartengrundlage: TK 1:50000 Würzburg und Umgebung (Ausgabe 1999)
Entwurf und Kartographie: C. Beck 09.1995

MAßSTAB 1:70000



Untersuchungsgebiet 1

Würzburg Heuchelhof - Rottenbauer

Übersichtskarte

LEGENDE

Stadtteilgrenze Heuchelhof

Strassen

Stedlungsflächen

Fließgewässer

Main

Wald

Bearbeitetes Gebiet

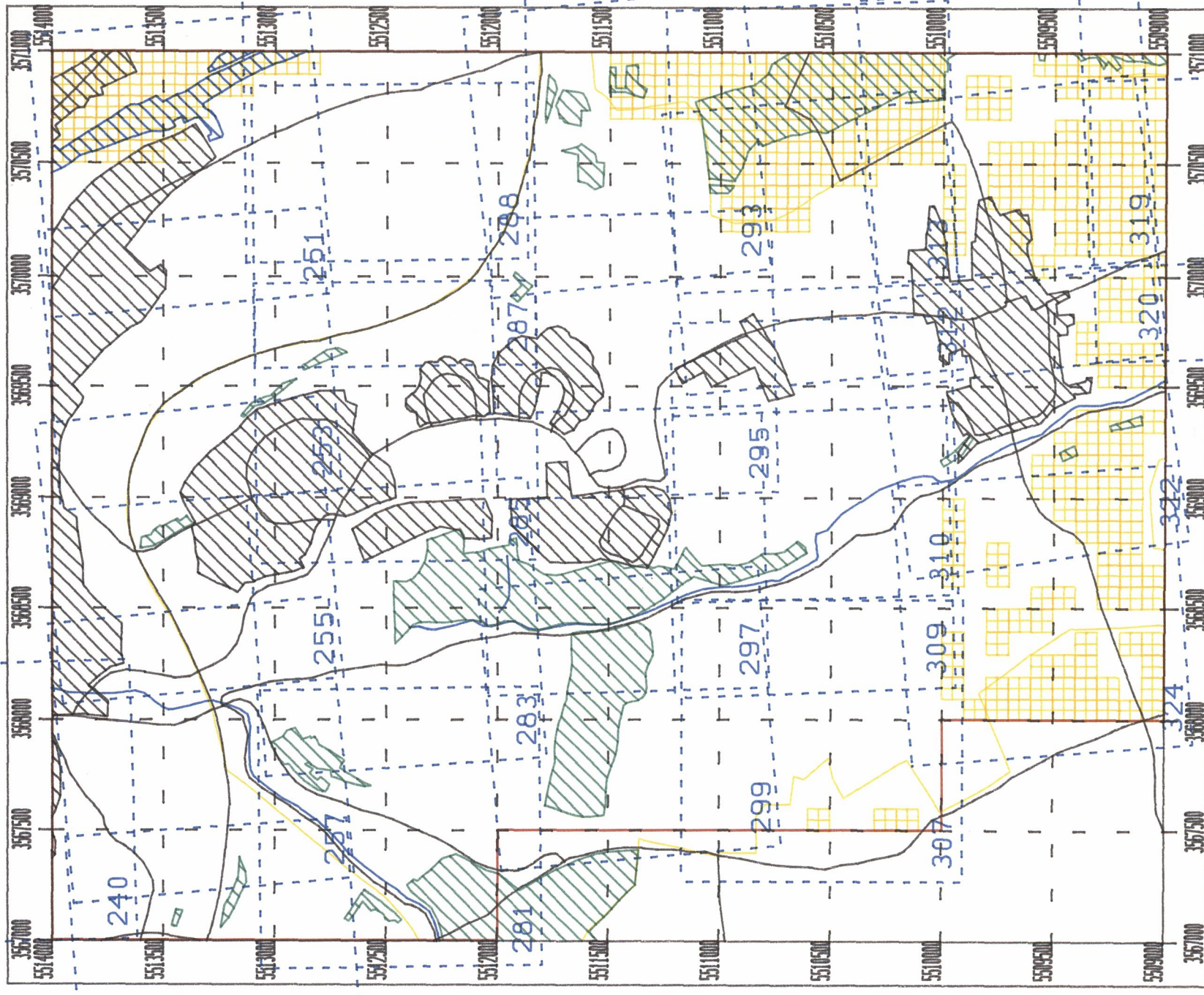
Luftbilder der Befliegung vom 30.04.1994

Ergänzte Raster der Flächenbilanz 1983

Kartengrundlage: TK 6225 Würzburg Süd (Ausgabe 1989)

Entwurf und Kartographie: C. Beck 09.1995

MAPSTAB 1:25000





Untersuchungsgebiet 1

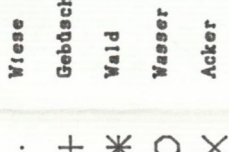
Würzburg Heuchelhof - Rottenbauer

Prozentuale Oberflächenanteile 1994

Natürliche Oberflächen



Dominierende Natürliche Oberfläche

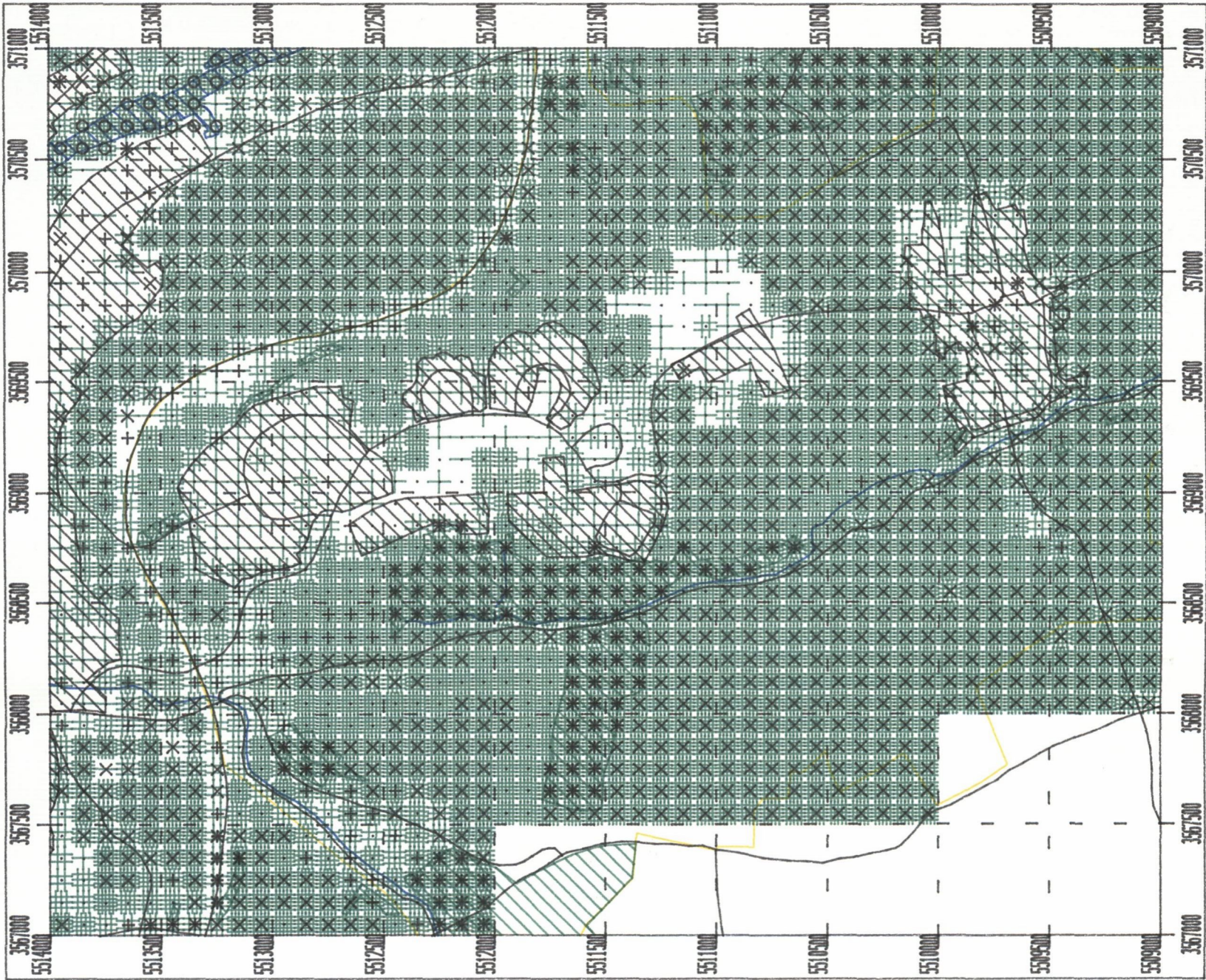


Datengrundlage: Flächenbilanz 1994

Kartengrundlage: TK 6225 Würzburg Süd (Ausgabe 1989)

Entwurf und Kartographie: C. Beck 10.1995

MAPSTAB 1:25000



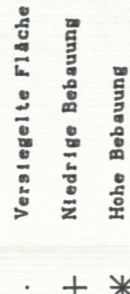
Untersuchungsgebiet 1 Würzburg Heuchelhof - Rottenbauer

Prozentuale Oberflächenanteile 1994

Künstliche Oberflächen



Dominierende Künstliche Oberfläche

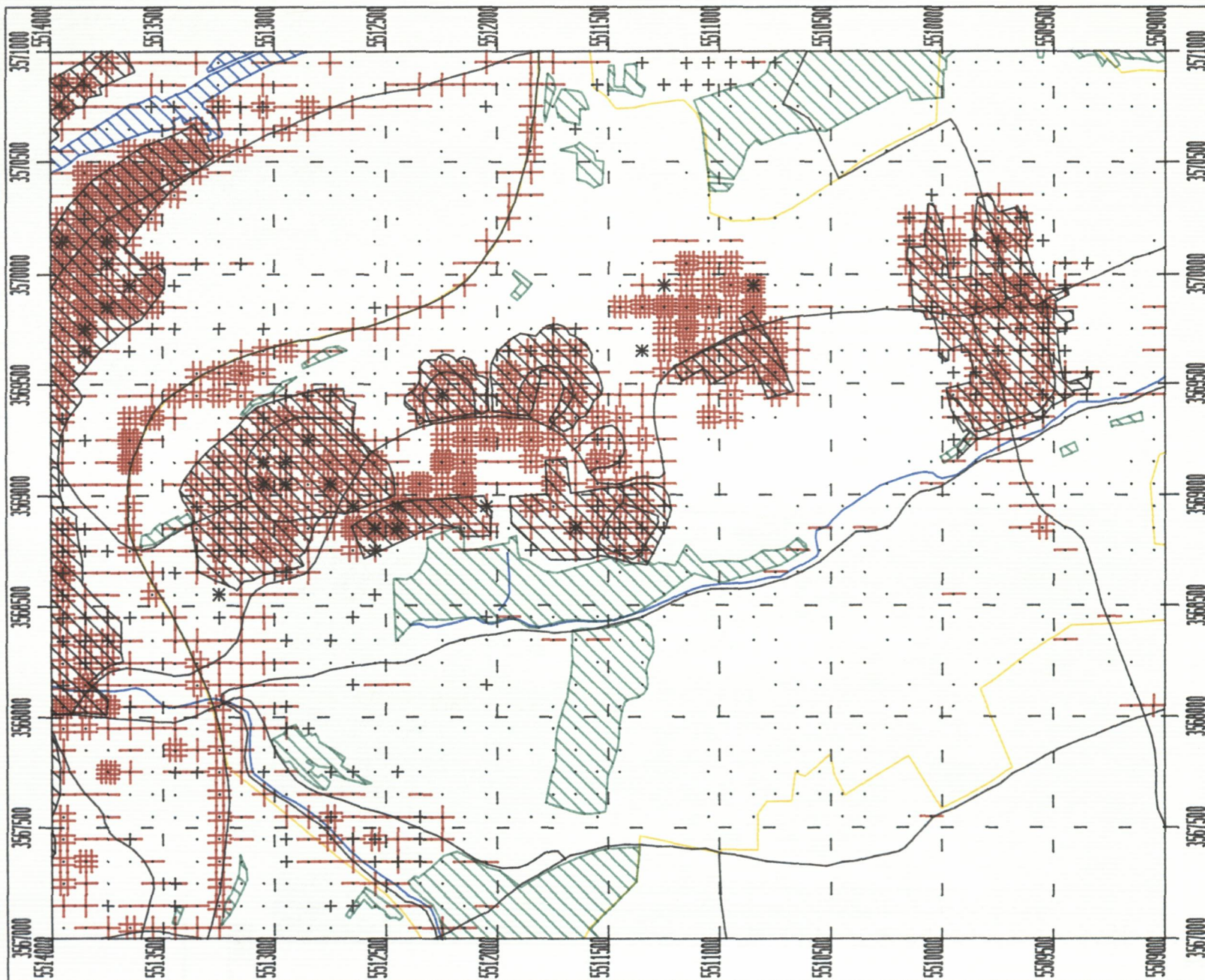


Datengrundlage: Flächenbilanz 1994

Kartengrundlage: TK 6225 Würzburg Süd (Ausgabe 1989)

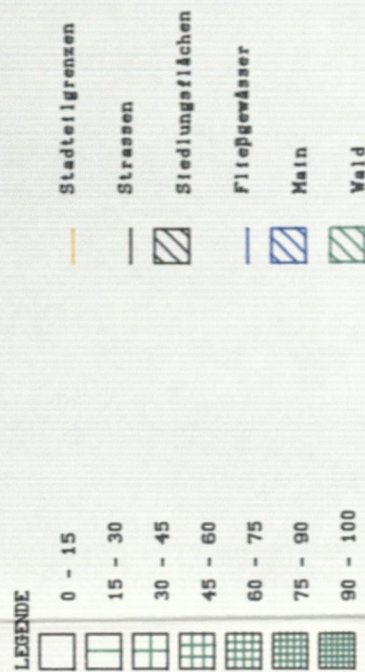
Entwurf und Kartographie: C. Beck 10.1995

MAPSTAB 1:25000

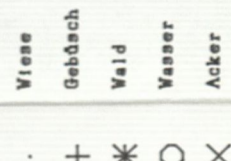


Untersuchungsgebiet 2 Würzburg Lengfeld

Prozentuale Oberflächenanteile 1994
Natürliche Oberflächen



Dominierende Natürliche Oberfläche

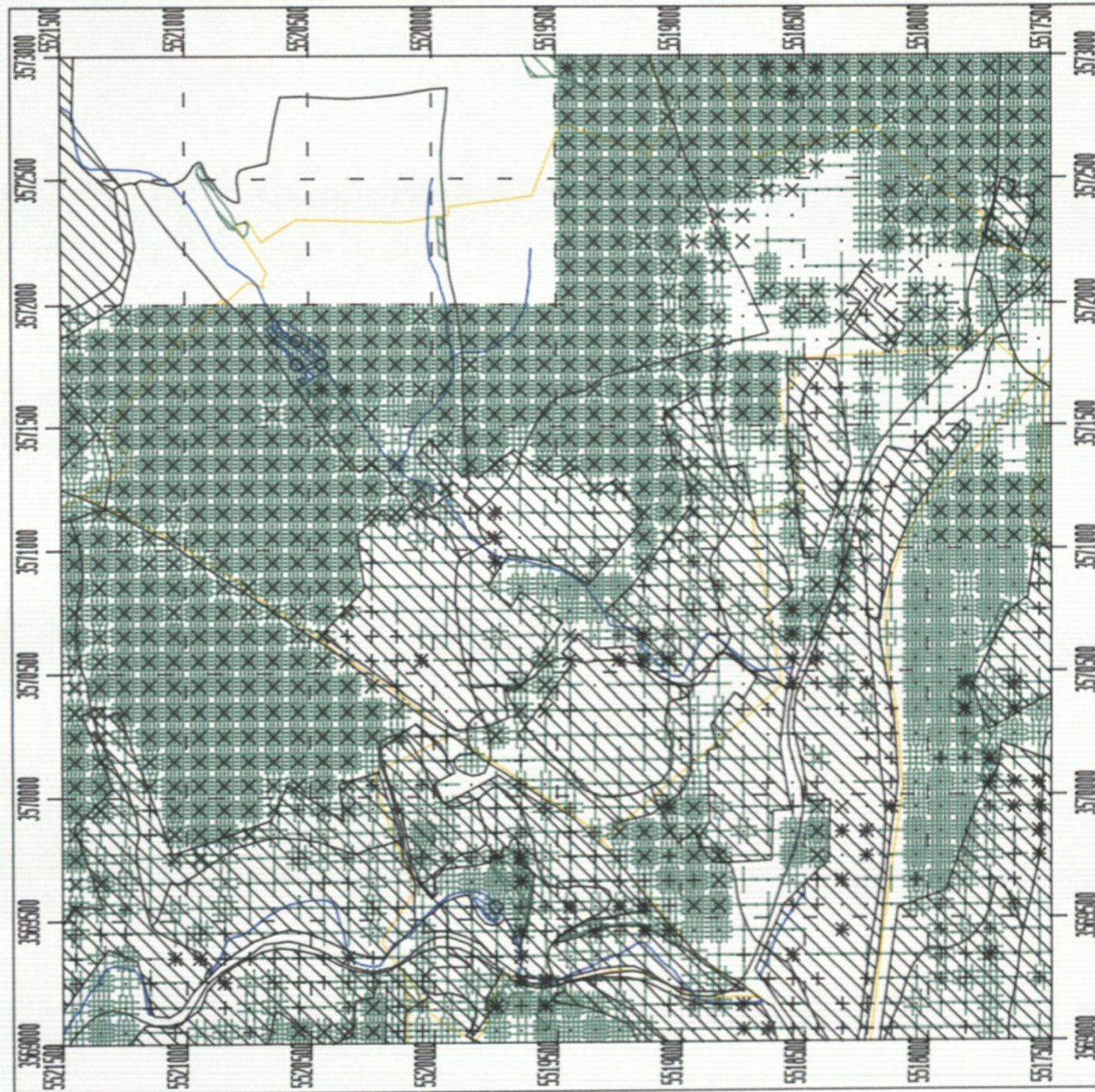


Datengrundlage: Flächenbilanz 1994

Kartengrundlage: TK 6125 Würzburg Nord (Ausgabe 1994)
TK 6126 Dettelbach (Ausgabe 1989)
TK 6225 Würzburg Süd (Ausgabe 1989)
TK 6226 Kitzingen (Ausgabe 1994)

Entwurf und Kartographie: C. Beck 10.1995

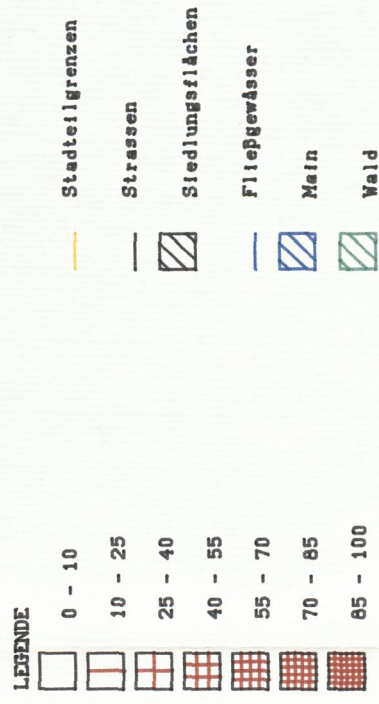
MAßSTAB 1:25000



Untersuchungsgebiet 2

Würzburg Lengfeld

Prozentuale Oberflächenanteile 1994
Künstliche Oberflächen



Dominierende Künstliche Oberfläche

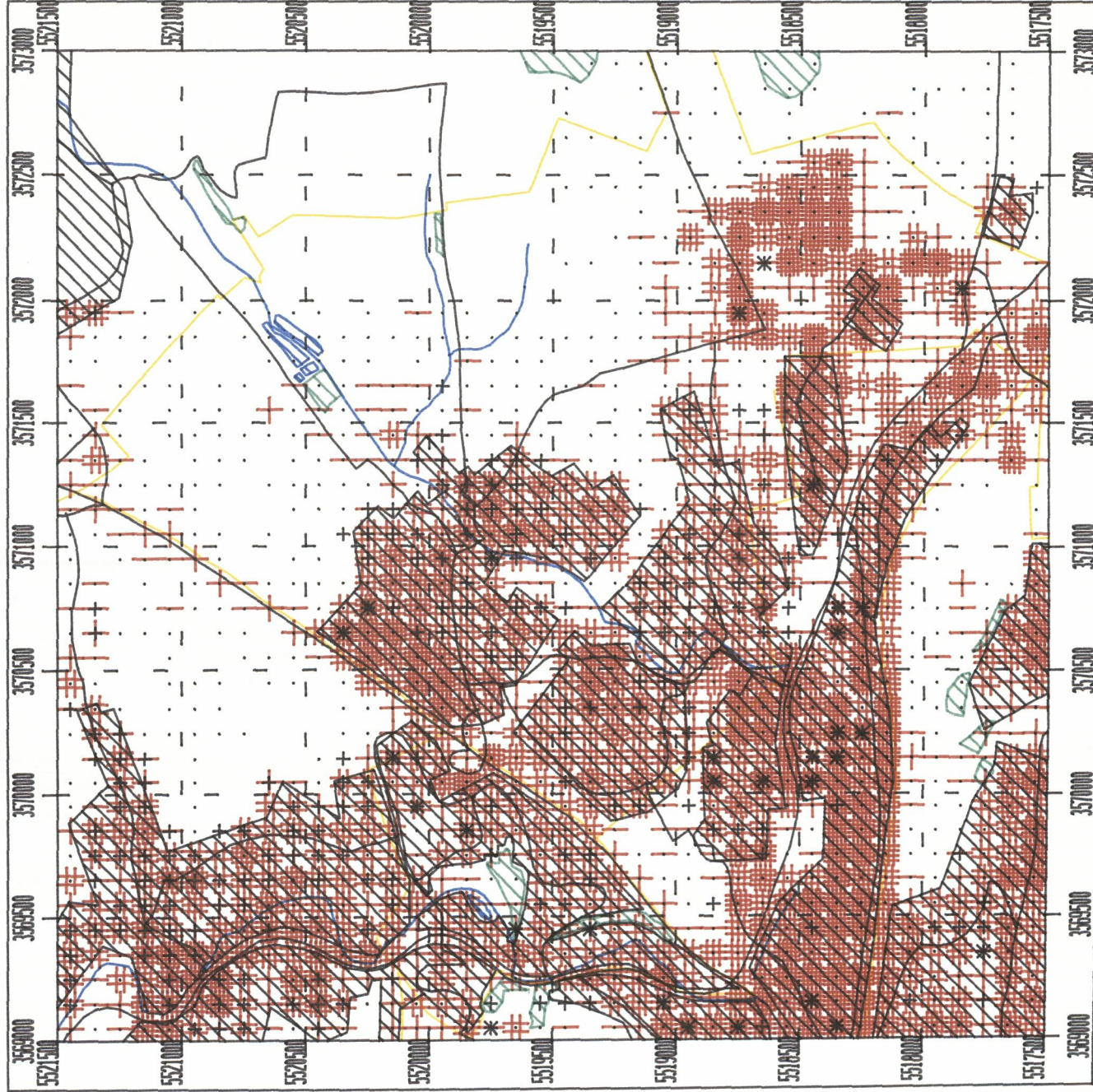
· Versiegelte Fläche
+ Niedrige Bebauung
* Hohe Bebauung

Datengrundlage: Flächenbilanz 1994

Kartengrundlage: TK 6125 Würzburg Nord (Ausgabe 1994)
TK 6126 Dettelbach (Ausgabe 1989)
TK 6225 Würzburg Süd (Ausgabe 1989)
TK 6226 Kitzingen (Ausgabe 1994)

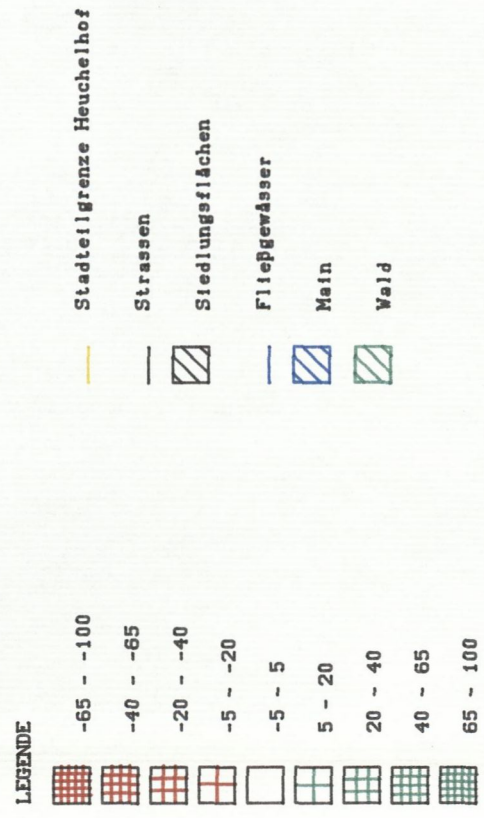
Entwurf und Kartographie: C. Beck 10.1995

MAPSTAB 1:25000



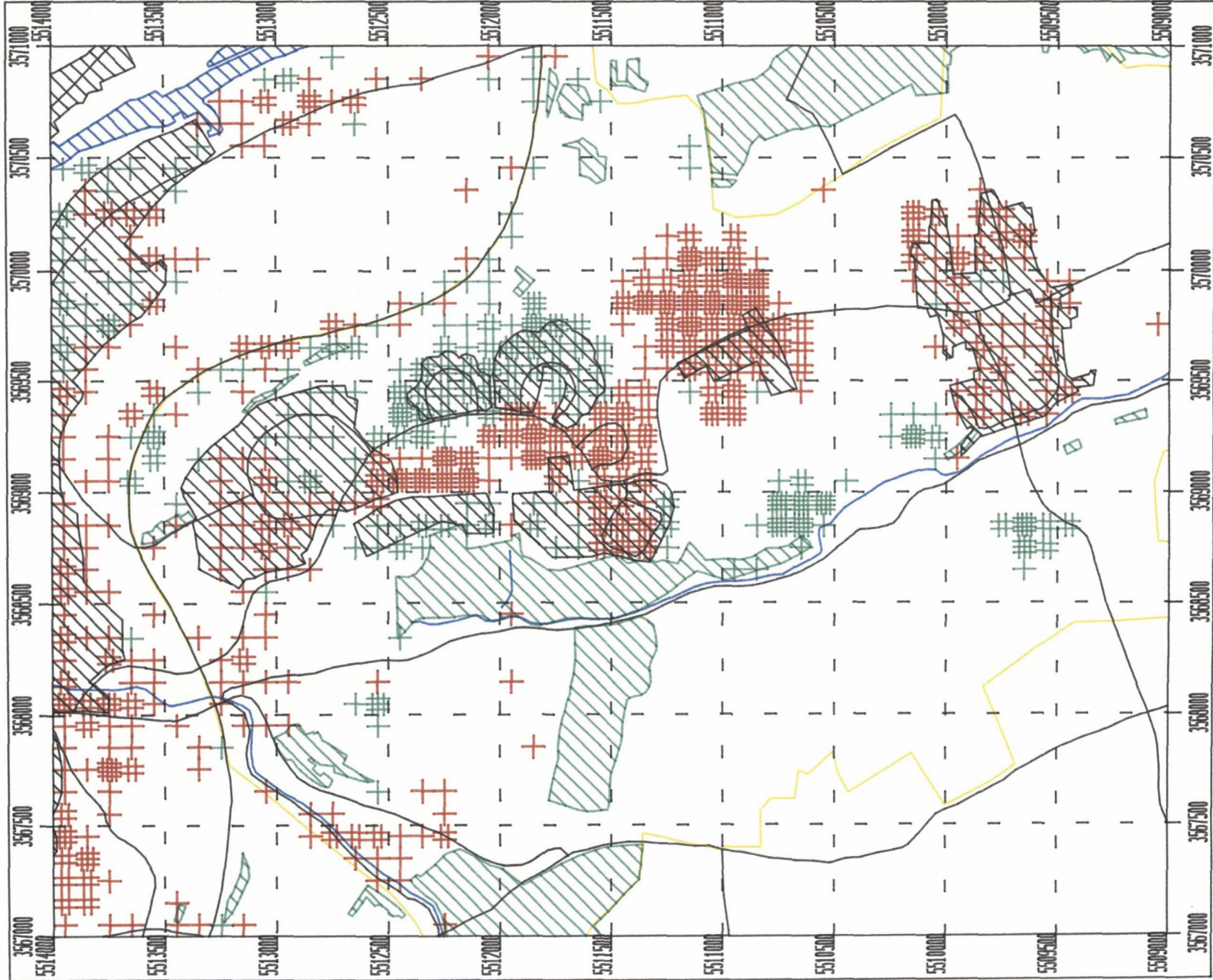
Untersuchungsgebiet 1 Würzburg Heuchelhof - Rottenbauer

Veränderung der prozentualen
Oberflächenanteile 1983 - 1994
Nichtversiegelte Freiflächen



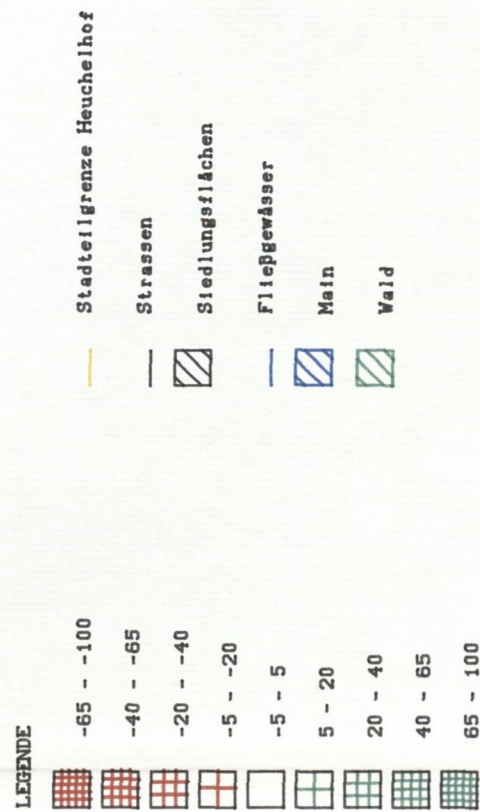
Datengrundlage: Flächenbilanzen 1983 und 1994
Kartengrundlage: TK 6225 Würzburg Süd (Ausgabe 1989)
Entwurf und Kartographie: C. Beck 08.1995

MASSSTAB 1:25000

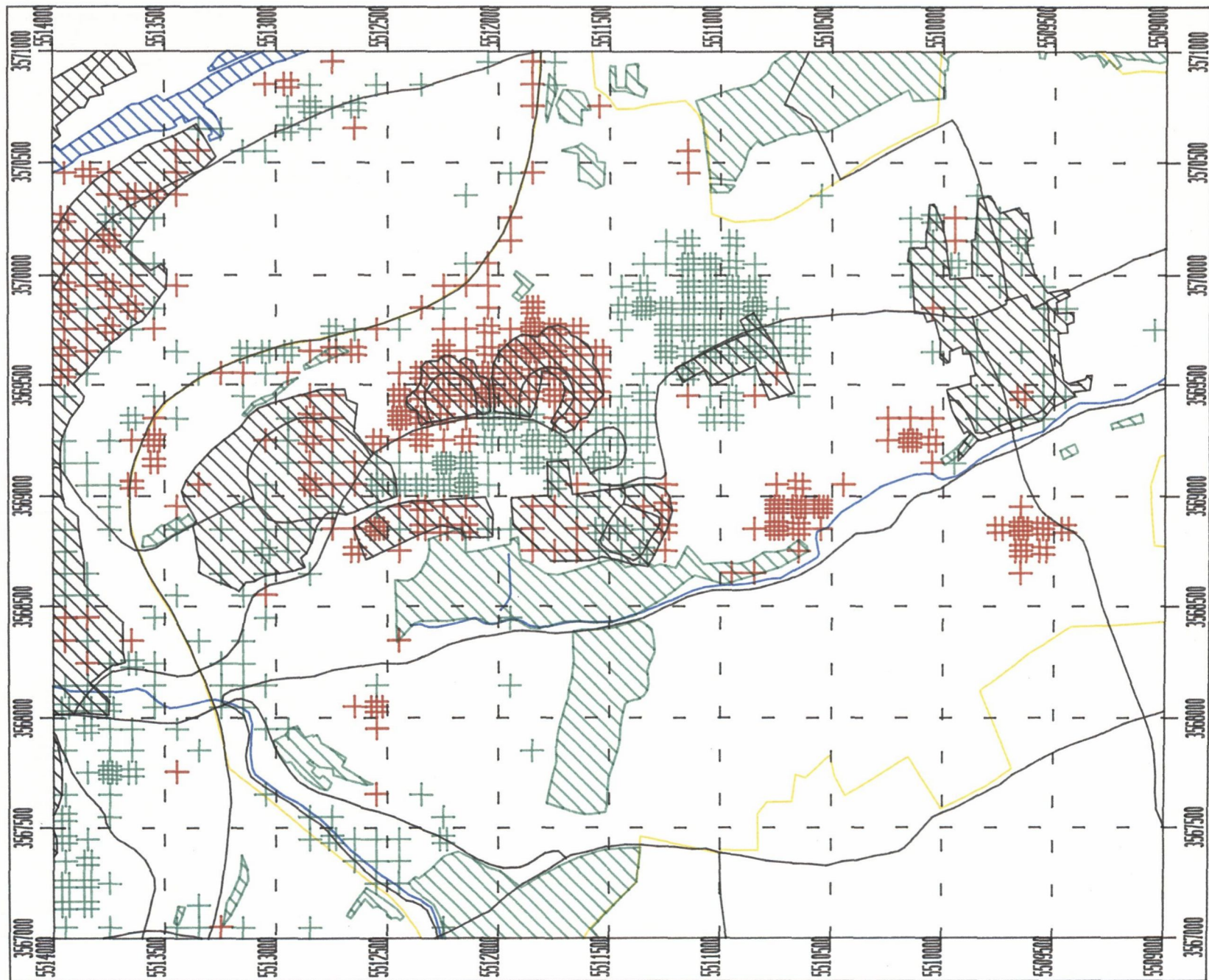


Untersuchungsgebiet 1 Würzburg Heuchelhof - Rottenbauer

Veränderung der prozentualen
Oberflächenanteile 1983 - 1994
Versiegelte Flächen



Datengrundlage: Flächenbilanzen 1983 und 1994
Kartengrundlage: TK 6225 Würzburg Süd (Ausgabe 1989)
Entwurf und Kartographie: C. Beck 08.1995

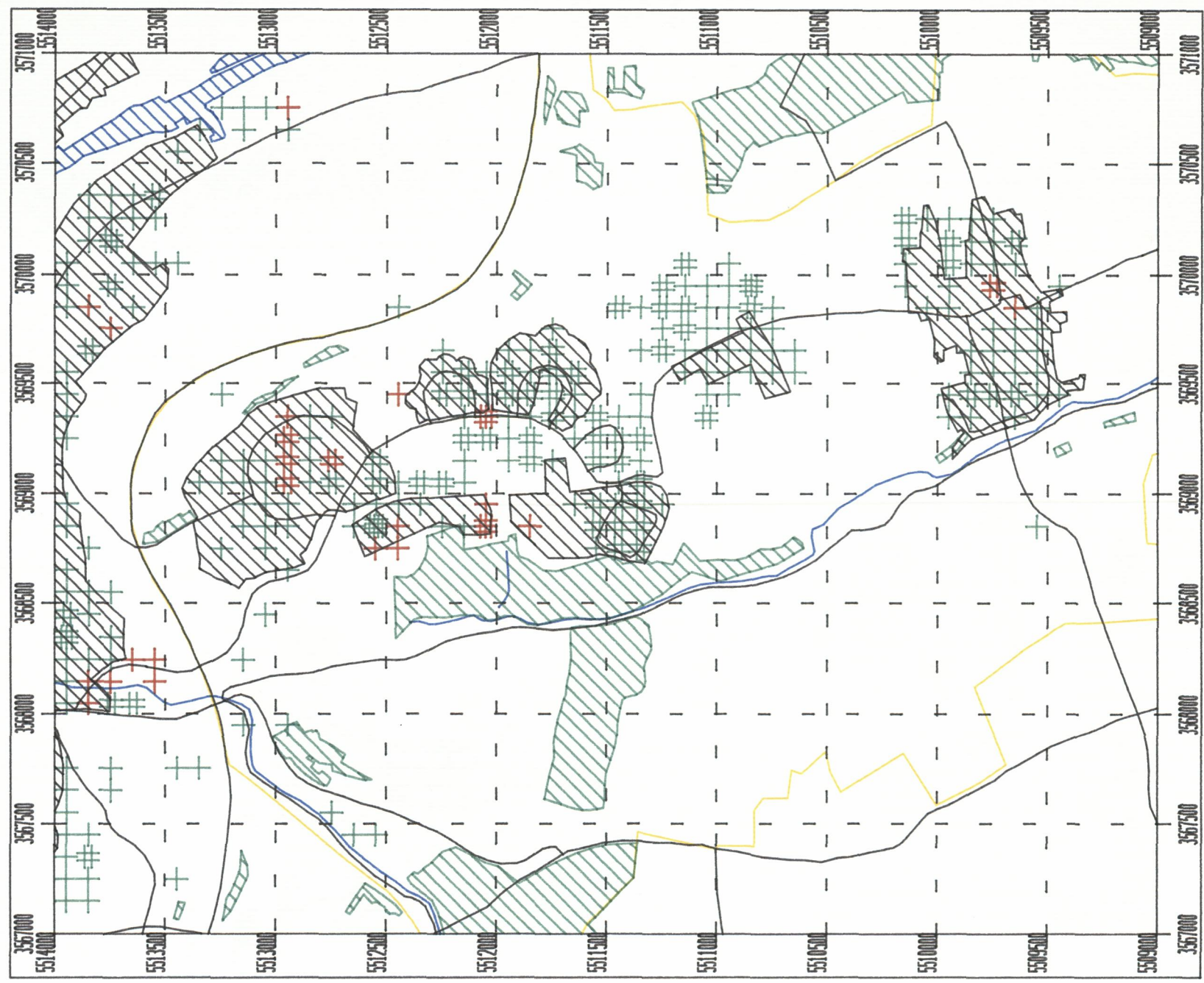


MASSSTAB 1:25000

Untersuchungsgebiet 1

Würzburg Heuchelhof - Rottenbauer

Veränderung der prozentualen Oberflächenanteile 1983 - 1994 Bebaute Flächen



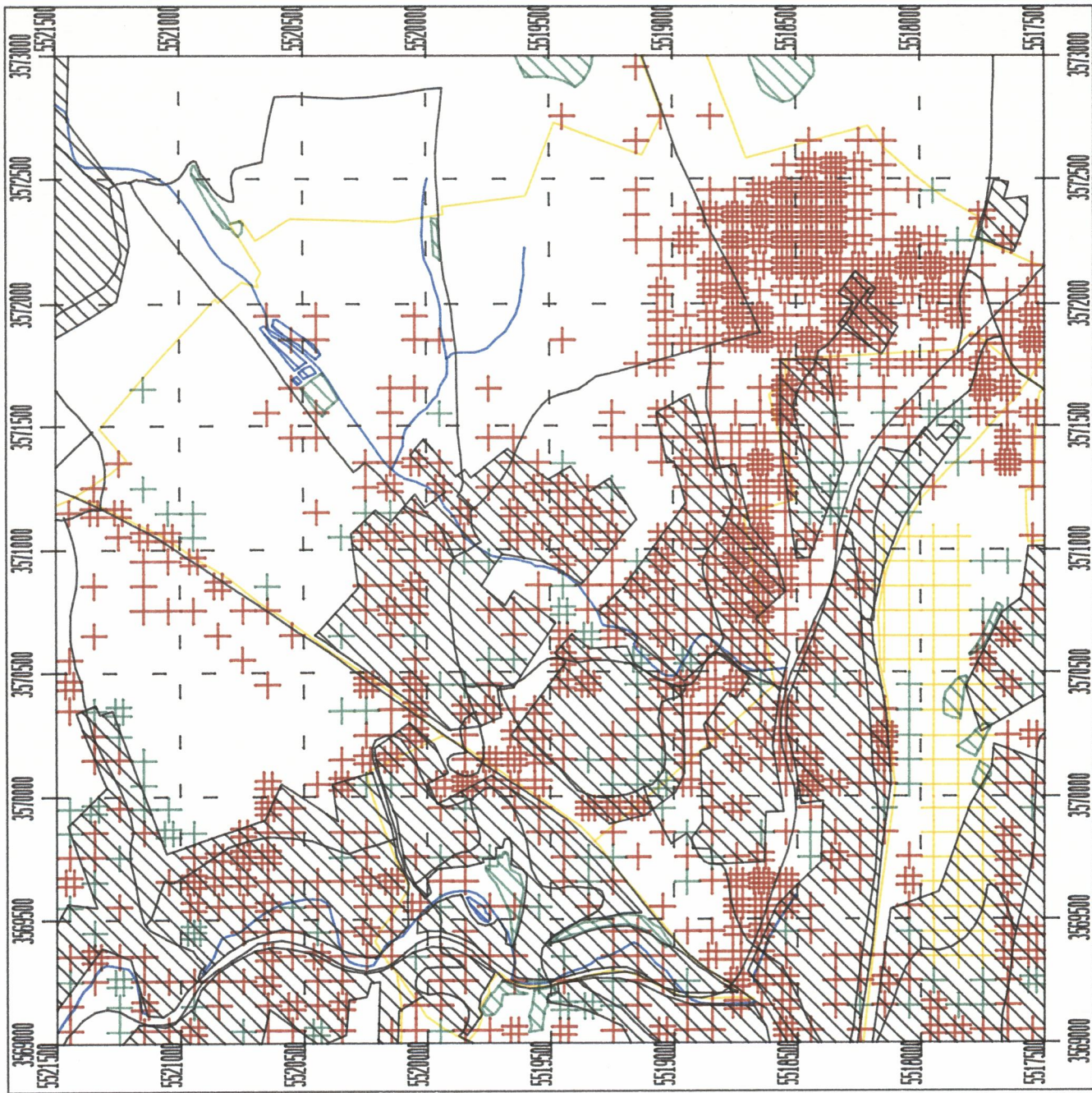
- LEGENDE**
- 65 - -100
 - 40 - -65
 - 20 - -40
 - 5 - -20
 - 5 - 5
 - 5 - 20
 - 20 - 40
 - 40 - 65
 - 65 - 100
- Stadteilgrenze Heuchelhof
 - Strassen
 - Siedlungsflächen
 - Fließgewässer
 - Wald
 - Wald

Datengrundlage: Flächenbilanzen 1983 und 1994
Kartengrundlage: TK 6225 Würzburg Süd (Ausgabe 1989)
Entwurf und Kartographie: C. Beck 08.1995

Untersuchungsgebiet 2

Würzburg Lengfeld

Veränderung der prozentualen
Oberflächenanteile 1983 - 1994
Nichtversiegelte Freiflächen



- LEGENDE
- 65 - -100
 - 40 - -65
 - 20 - -40
 - 5 - -20
 - 5 - 5
 - 5 - 20
 - 20 - 40
 - 40 - 65
 - 65 - 100
 - Keine Daten der Flächenbilanz 1983
 - Stadtteilgrenzen
 - Strassen
 - Stedlungsflächen
 - Fließgewässer
 - Stehende Gewässer
 - Wald

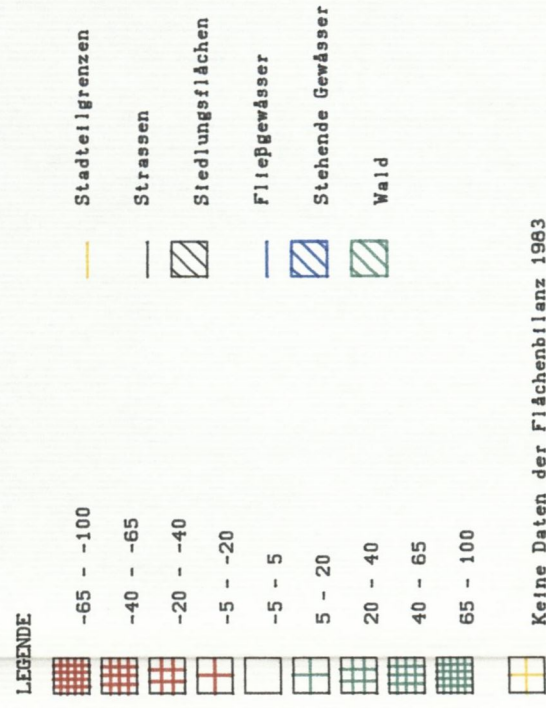
Datengrundlage: Flächenbilanzen 1983 und 1994
Kartengrundlage: TK 6125 Würzburg Nord (Ausgabe 1994)
TK 6126 Dettelbach (Ausgabe 1989)
TK 6225 Würzburg Süd (Ausgabe 1989)
TK 6226 Kitzingen (Ausgabe 1994)

Entwurf und Kartographie: C. Beck 06.1995

MASSSTAB 1:25000

Untersuchungsgebiet 2 Würzburg Lengfeld

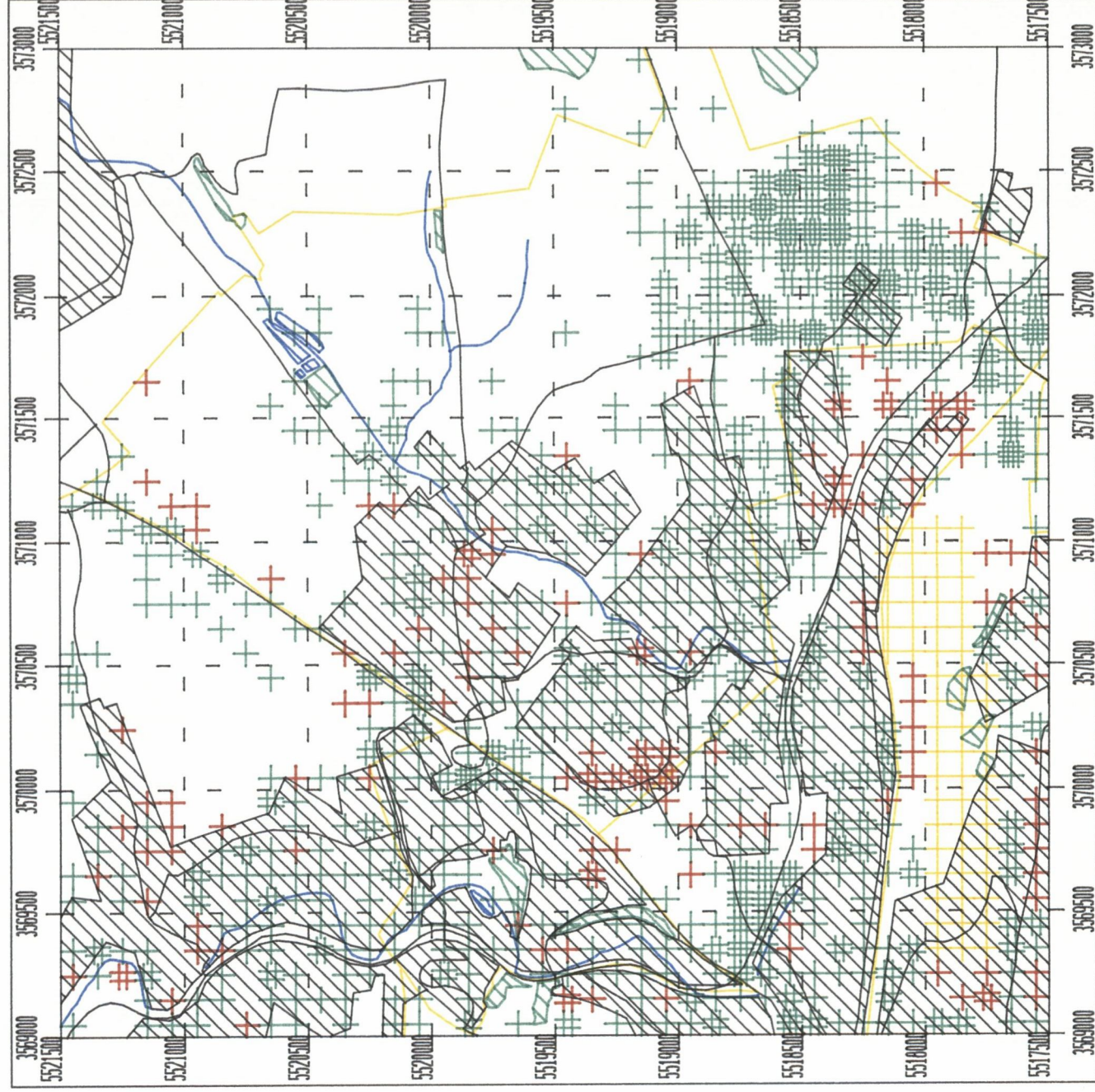
Veränderung der prozentualen
Oberflächenanteile 1983 - 1994
Versiegelte Flächen



Datengrundlage: Flächenbilanzen 1983 und 1994
Kartengrundlage: TK 6125 Würzburg Nord (Ausgabe 1994)
TK 6126 Dettelbach (Ausgabe 1989)
TK 6225 Würzburg Süd (Ausgabe 1989)
TK 6226 Kitzingen (Ausgabe 1994)

Entwurf und Kartographie: C. Beck 08.1995

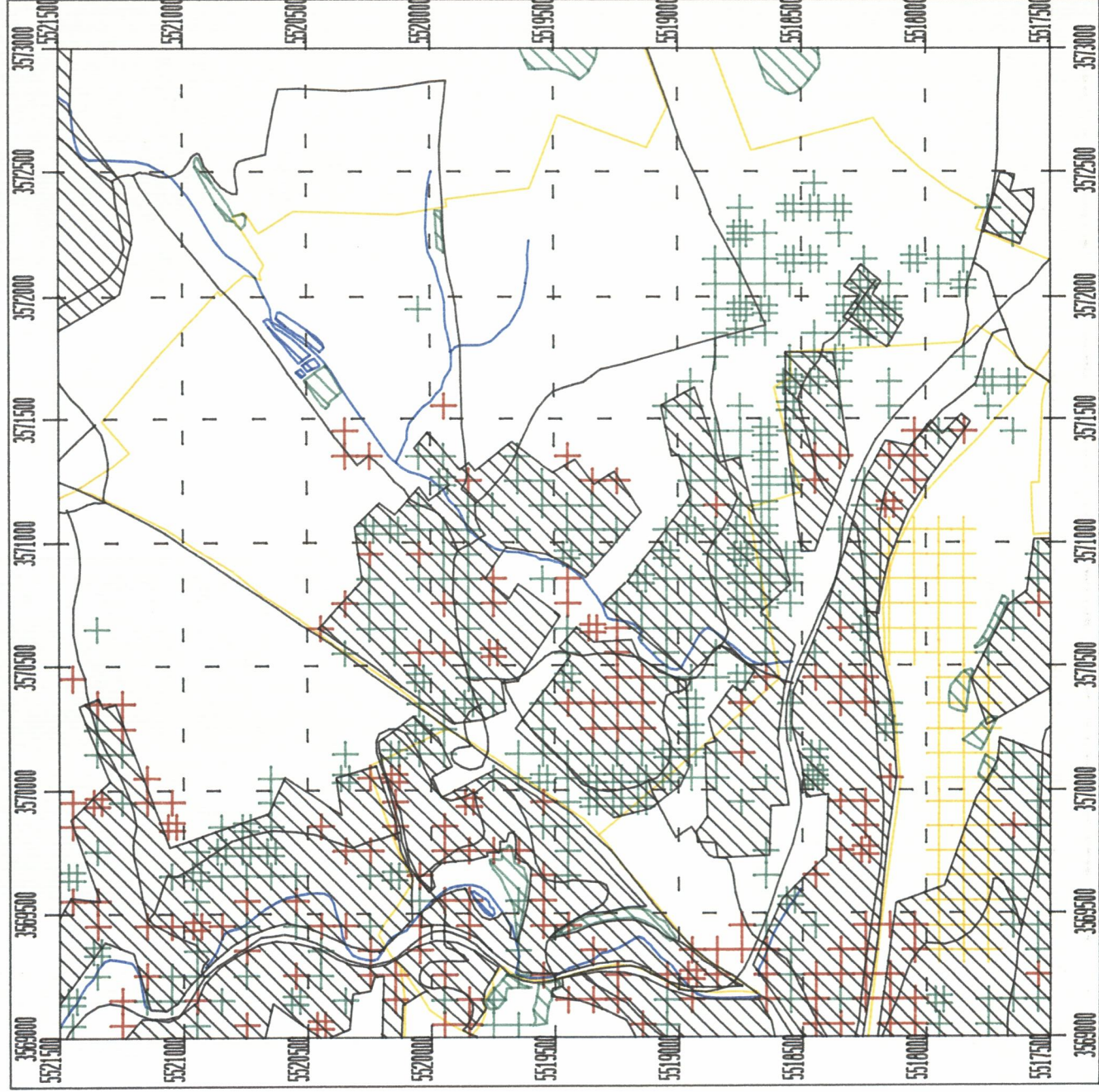
MASSSTAB 1:25000



Untersuchungsgebiet 2

Würzburg Lengfeld

Veränderung der prozentualen
Oberflächenanteile 1983 - 1994
Bebaute Flächen



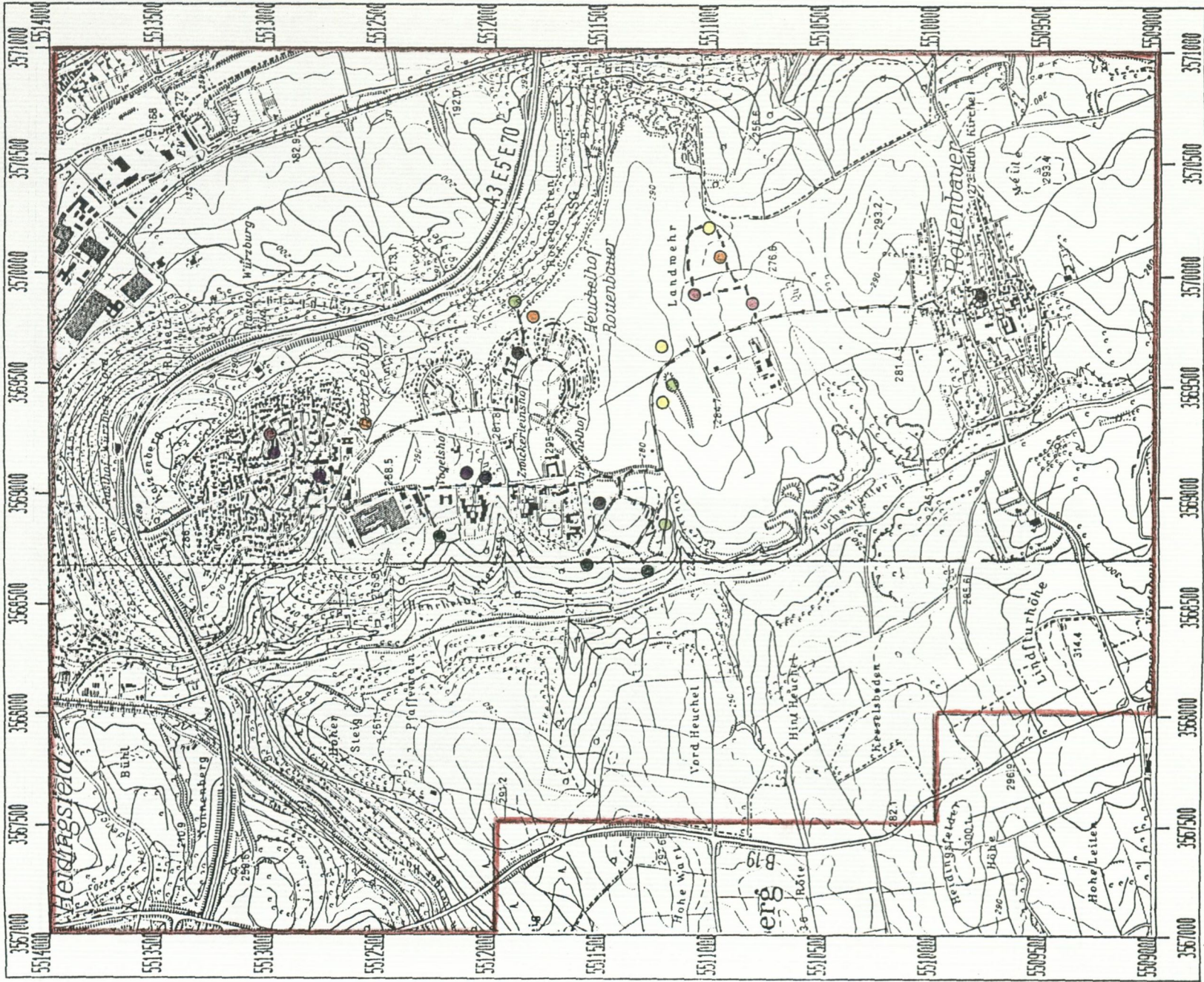
Meßfahrten zur Erfassung von
Lufttemperatur und -feuchtigkeit
in 2m Höhe
am 30.06.1995

- LEGENDE
- Wiese
 - Gebüsch
 - Wald
 - Wasser
 - Acker
 - Versiegelte Fläche
 - Niedrige Bebauung
 - Hohe Bebauung
 - Meßroute
 - Untersuchungsgebiet 1

Kartengrundlage: TK 6125 Würzburg Süd (Ausgabe 1989)

Entwurf und Kartographie: C. Beck 09.1995

MAßSTAB 1:25000



Untersuchungsgebiet 1 Würzburg Heuchelhof - Rottenbauer

Temperaturveränderungen 1983 - 1994
Lufttemperatur in 2m Höhe
Vor Sonnenaufgang

LEGENDE

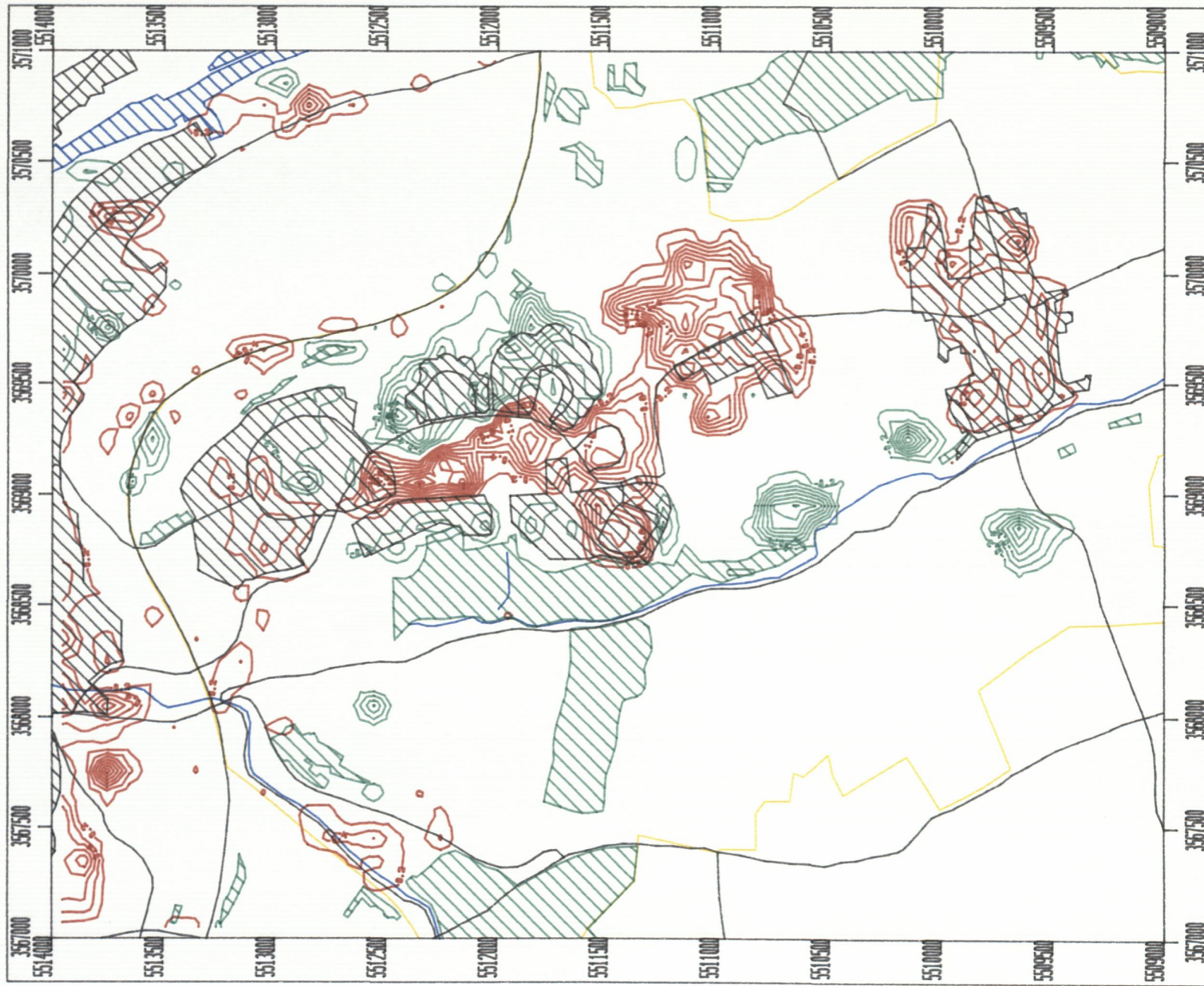
- Temperaturzunahme in ° Celsius
- Temperaturabnahme in ° Celsius
- Stadtteilgrenze Heuchelhof
- Strassen
- ▨ Siedlungsflächen
- Fließgewässer
- ▨ Main
- ▨ Wald

Datengrundlage: Flächenbilanzen 1983 und 1994

Temperaturmessungen vom 30.06.1995

Kartengrundlage: TK 6225 Würzburg Süd (Ausgabe 1989)

Entwurf und Kartographie: C. Beck 09.1995



MAßSTAB 1:25000

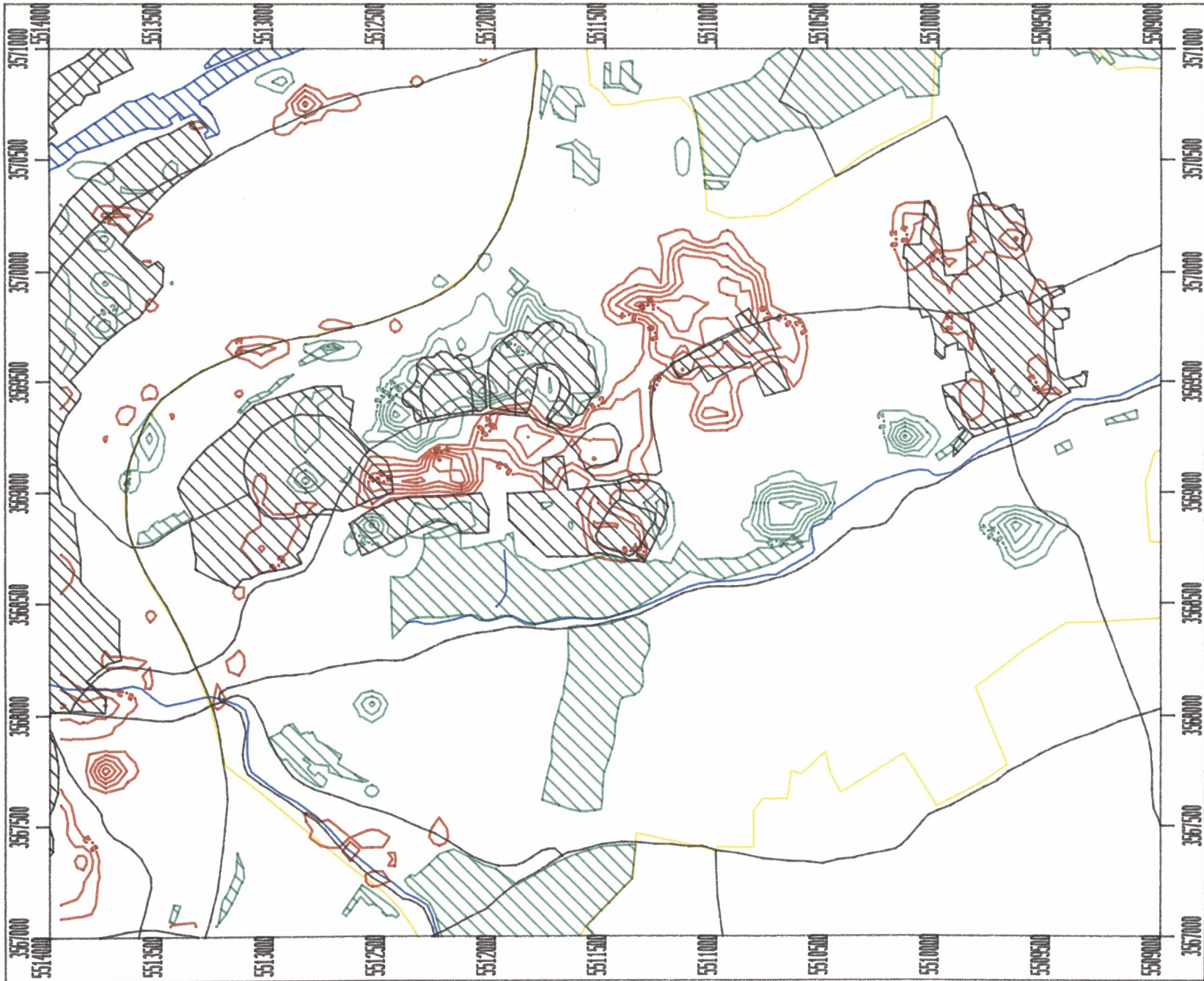
Untersuchungsgebiet 1 Würzburg Heuchelhof - Rottenbauer

Temperaturveränderungen 1983 - 1994
Lufttemperatur in 2m Höhe
Mittags

- LEGENDE
- Temperaturzunahme in ° Celsius
 - Temperaturabnahme in ° Celsius
 - Stadtteilgrenze Heuchelhof
 - Strassen
 - Siedlungsflächen
 - Fließgewässer
 - Main
 - Wald

Datengrundlage: Flächenbilanzen 1983 und 1994
Temperaturmessungen vom 30.06.1995
Kartengrundlage: TK 6225 Würzburg Süd (Ausgabe 1989)
Entwurf und Kartographie: C. Beck 09.1995

MAPSTAB 1:25000



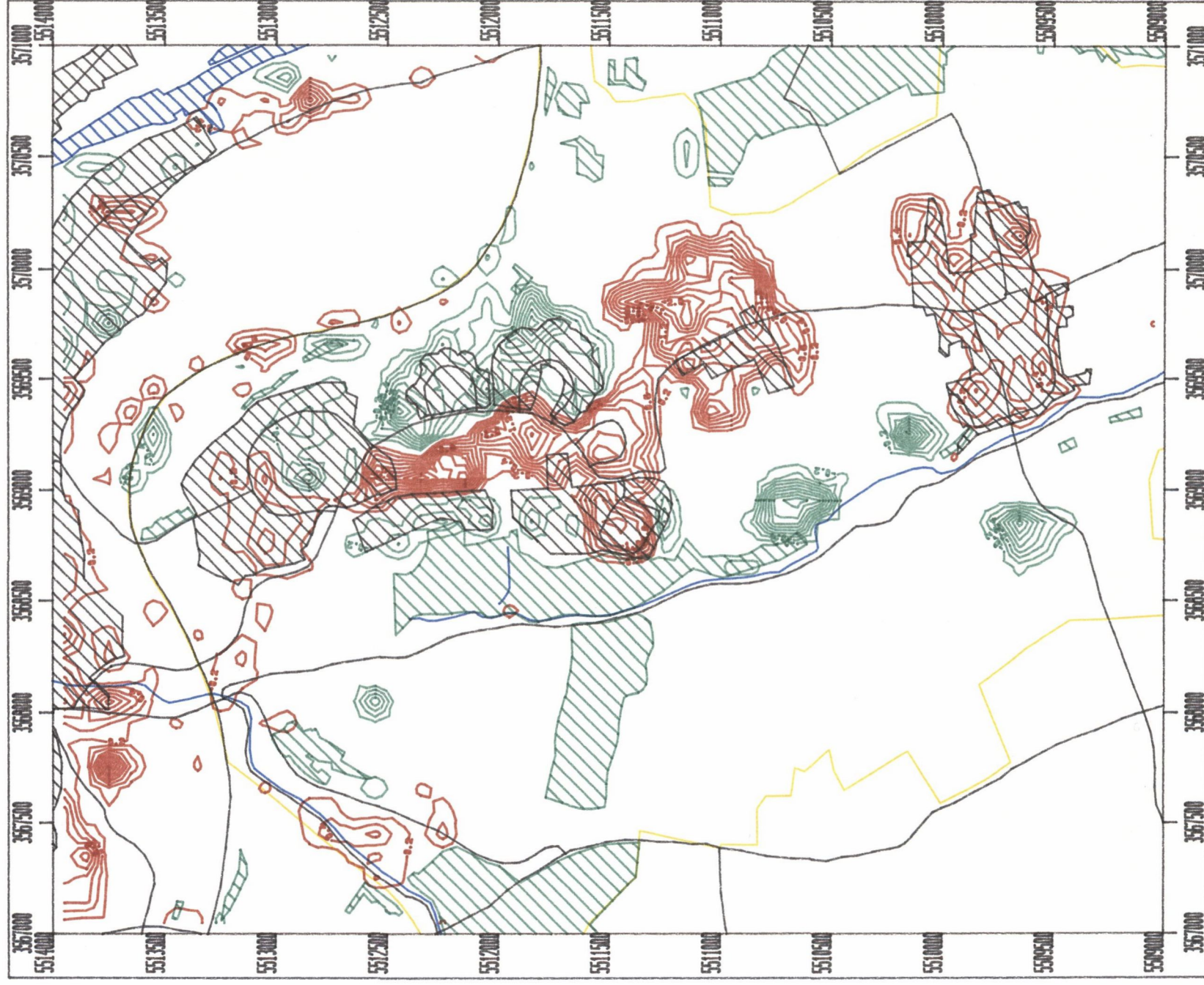
Untersuchungsgebiet 1 Würzburg Heuchelhof - Rottenbauer

Temperaturveränderungen 1983 - 1994
Lufttemperatur in 2m Höhe
Nach Sonnenuntergang

- LEGENDE
- Temperaturzunahme in ° Celsius
 - Temperaturabnahme in ° Celsius
 - Stadtteilgrenze Heuchelhof
 - Strassen
 - Siedlungsflächen
 - Fließgewässer
 - Main
 - Wald

Datengrundlage: Flächenbilanzen 1983 und 1994
Temperaturmessungen vom 30.06.1995
Kartengrundlage: TK 6225 Würzburg Süd (Ausgabe 1989)
Entwurf und Kartographie: C. Beck 09.1995

MAPSTAB 1:25000



Untersuchungsgebiet 2

Würzburg Lengfeld

Änderungen des Dampfdrucks 1983 - 1994
Dampfdruck in 2m Höhe
Vor Sonnenaufgang

LEGENDE

- Dampfdruckzunahme in hPa
- Dampfdruckabnahme in hPa
- Stadtteilengrenzen
- Strassen
- Siedlungsflächen
- Fließgewässer
- Stehende Gewässer
- Wald

Datengrundlage: Flächenbilanzen 1983 und 1994

Temperatur- und Feuchtemessungen vom 30.06.1995

Kartengrundlage: TK 6125 Würzburg Nord (Ausgabe 1994)

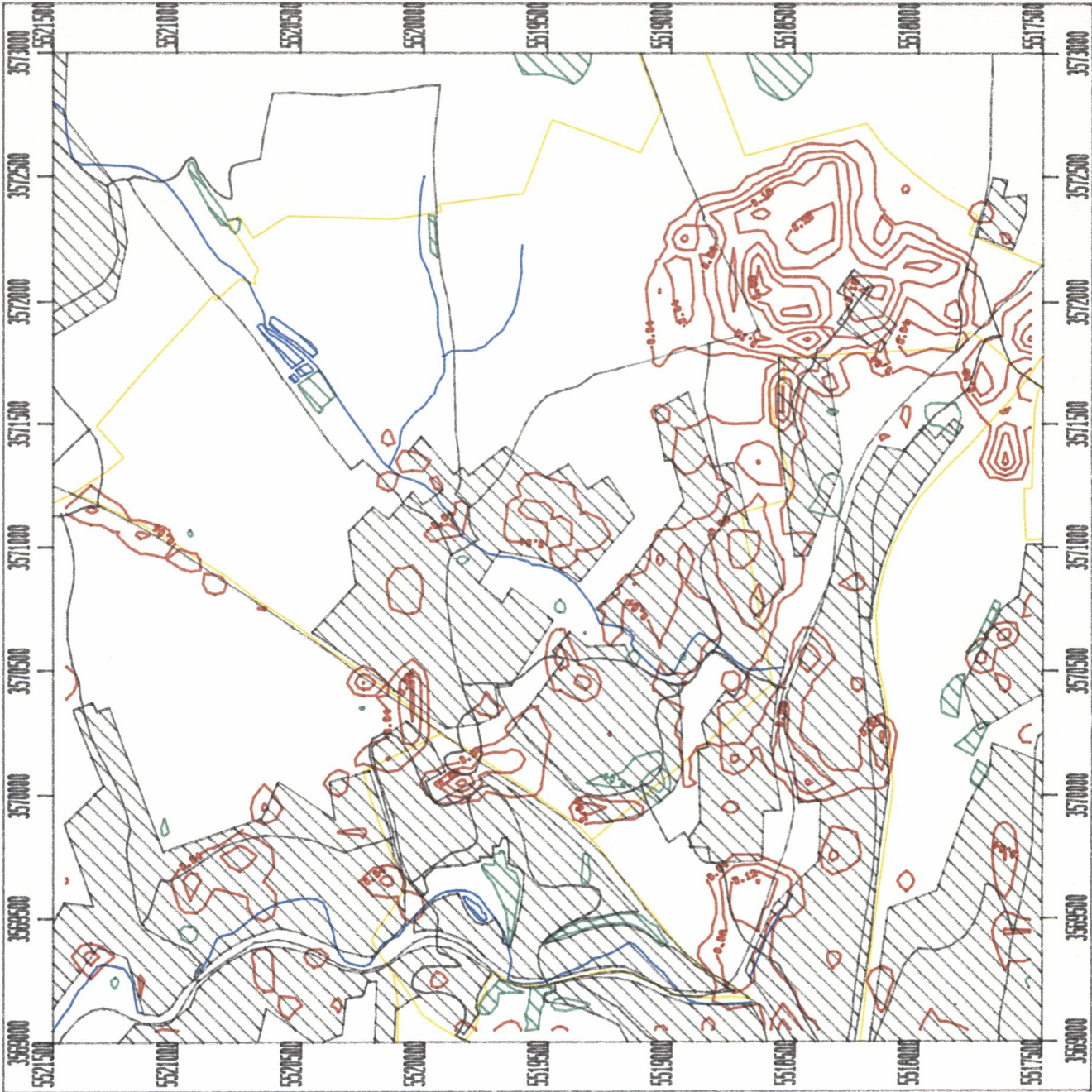
TK 6126 Dettelbach (Ausgabe 1989)

TK 6225 Würzburg Süd (Ausgabe 1989)

TK 6226 Kitzingen (Ausgabe 1994)

Entwurf und Kartographie: C. Beck 09.1995

MAPSTAB 1:25000



Untersuchungsgebiet 2

Würzburg Lengfeld

Temperaturveränderungen 1983 - 1994
Lufttemperatur in 2m Höhe
Mittags

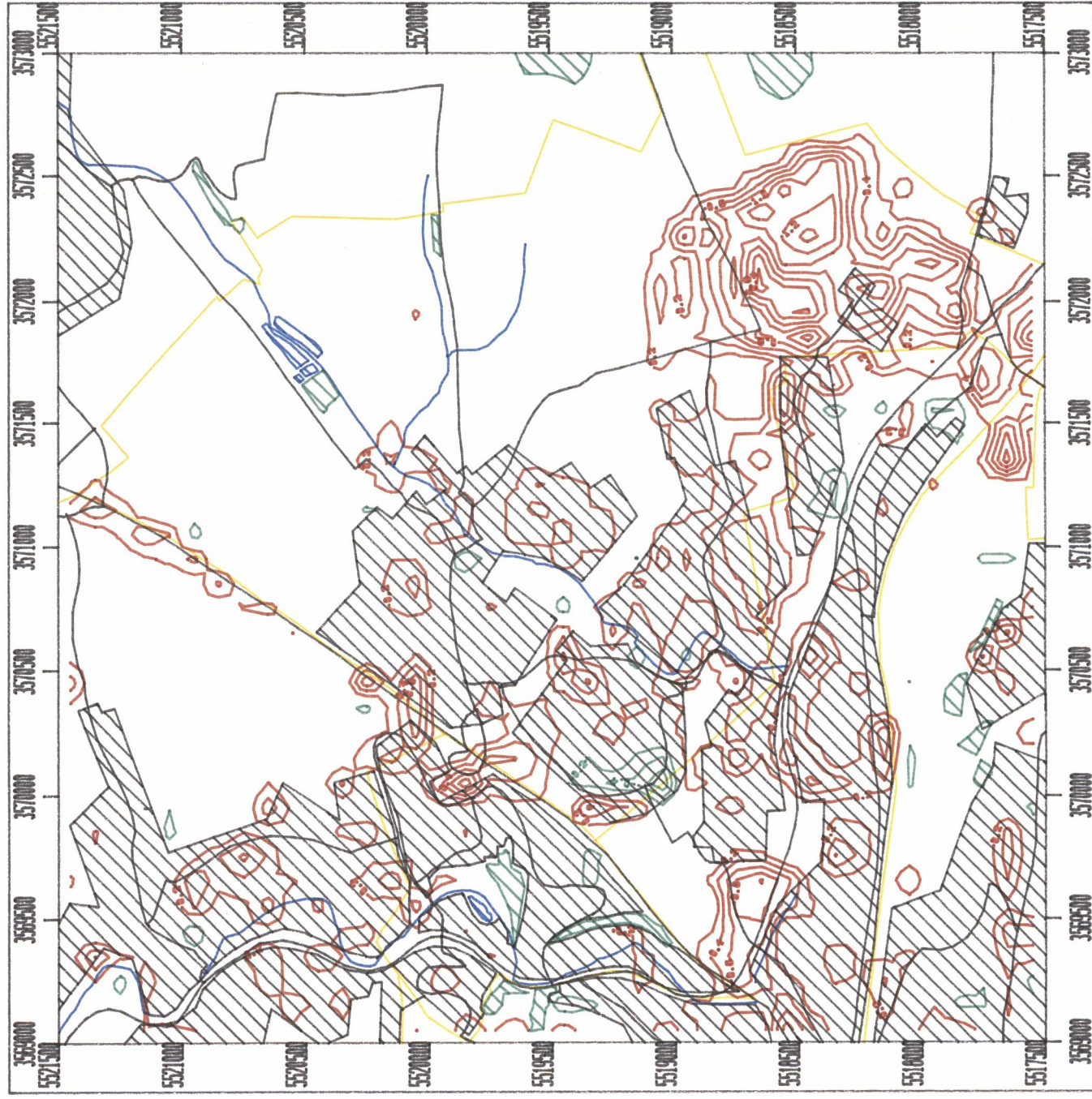
LEGENDE

- Temperaturzunahme in ° Celsius
- Temperaturabnahme in ° Celsius
- Stadtteilgrenzen
- Strassen
- Siedlungsflächen
- Fließgewässer
- Stehende Gewässer
- Wald

Datengrundlage: Flächenbilanzen 1983 und 1994
Temperaturmessungen vom 30.06.1995
Kartengrundlage: TK 6125 Würzburg Nord (Ausgabe 1994)
TK 6126 Dettelbach (Ausgabe 1989)
TK 6225 Würzburg Süd (Ausgabe 1989)
TK 6226 Kitzingen (Ausgabe 1994)

Entwurf und Kartographie: C. Beck 09.1995

MAPSTAB 1:25000



Untersuchungsgebiet 2

Würzburg Lengfeld

Temperaturveränderungen 1983 - 1994
Lufttemperatur in 2m Höhe
Nach Sonnenuntergang

LEGENDE

- Temperaturzunahme in ° Celsius
- Temperaturabnahme in ° Celsius
- Stadtteilgrenzen
- Strassen
- Siedlungsflächen
- Fließgewässer
- Stehende Gewässer
- Wald

Datengrundlage: Flächenbilanzen 1983 und 1994

Temperaturmessungen vom 30.06.1995

Kartengrundlage: TK 6125 Würzburg Nord (Ausgabe 1994)

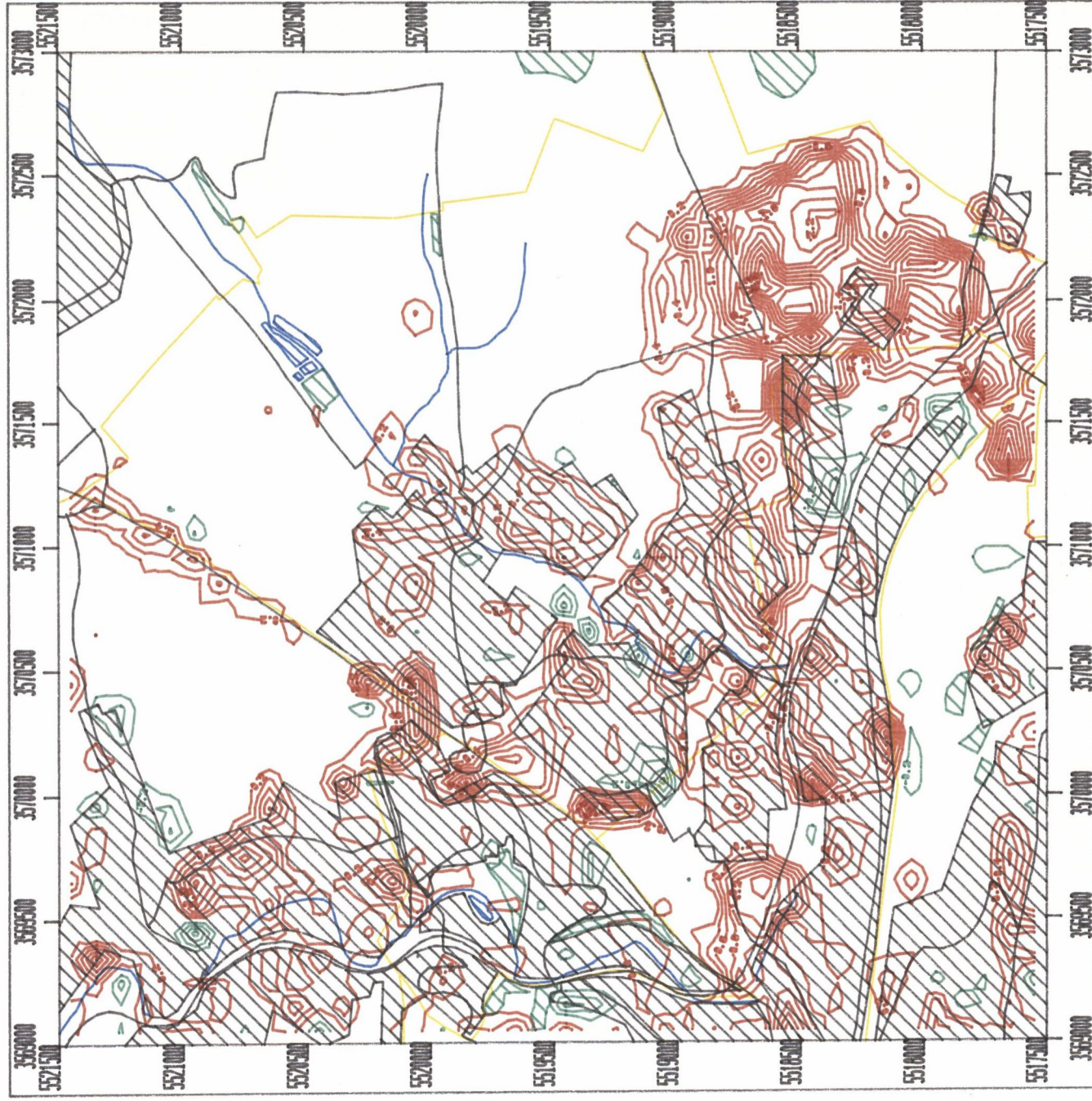
TK 6126 Dettelbach (Ausgabe 1989)

TK 6225 Würzburg Süd (Ausgabe 1989)

TK 6226 Kitzingen (Ausgabe 1994)

Entwurf und Kartographie: C. Beck 09.1995

MAßSTAB 1:25000



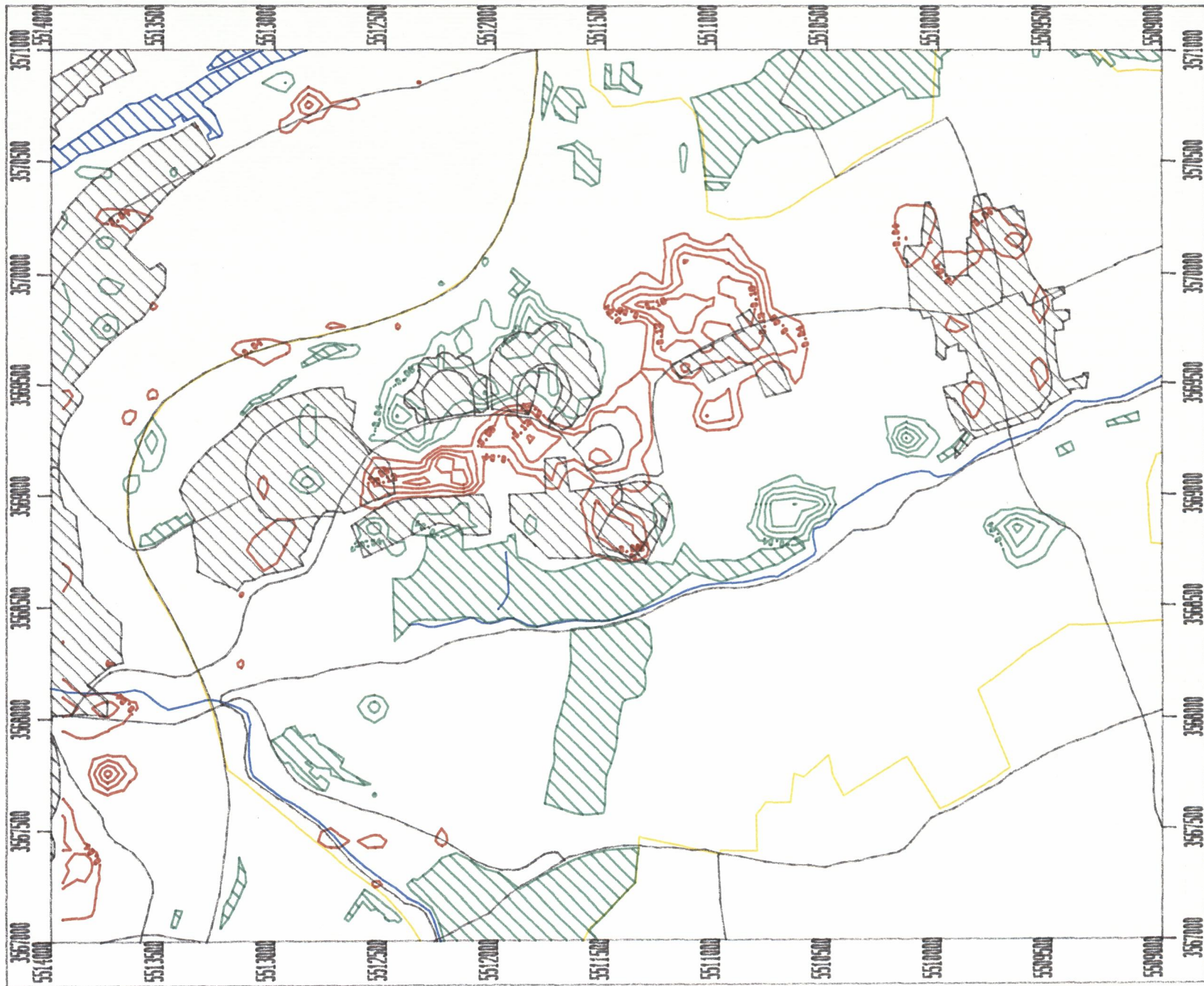
Untersuchungsgebiet 1 Würzburg Heuchelhof - Rottenbauer

Änderungen des Dampfdrucks 1983 - 1994
Dampfdruck in 2m Höhe
Vor Sonnenaufgang

- LEGENDE
- Dampfdruckzunahme in hPa
 - Dampfdruckabnahme in hPa
 - Stadtteilgrenze Heuchelhof
 - Strassen
 - Siedlungsflächen
 - Fließgewässer
 - Main
 - Wald

Datengrundlage: Flächenbilanzen 1983 und 1994
Temperatur- und Feuchtemessungen vom 30.06.1995
Kartengrundlage: TK 6225 Würzburg Süd (Ausgabe 1989)
Entwurf und Kartographie: C. Beck 09.1995

MAßSTAB 1:25000



Untersuchungsgebiet 1 Würzburg Heuchelhof - Rottenbauer

Änderungen des Dampfdrucks 1983 - 1994
Dampfdruck in 2m Höhe
Mittags

LEGENDE

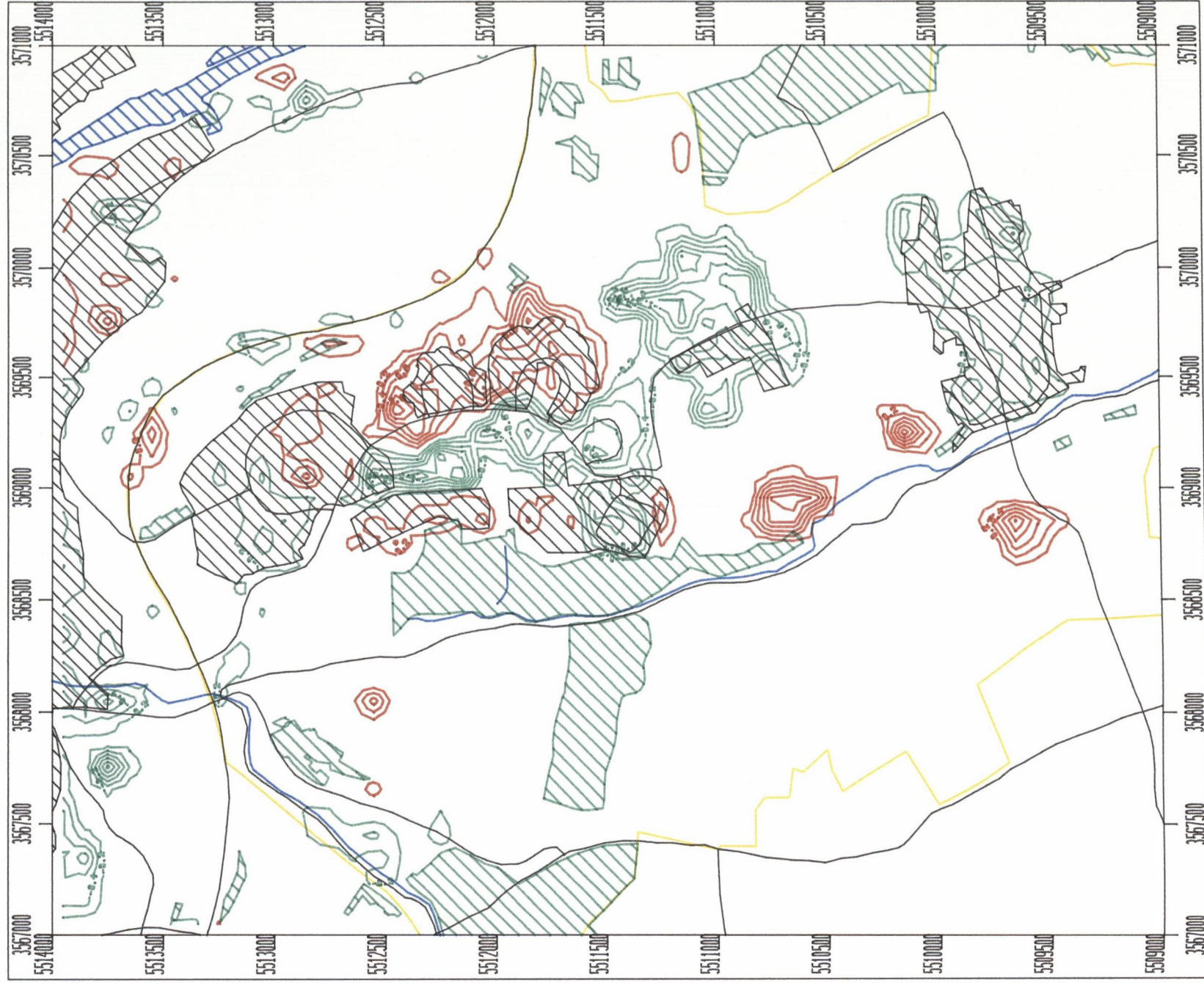
- Dampfdruckzunahme in hPa
- Dampfdruckabnahme in hPa
- Stadtteilgrenze Heuchelhof
- Strassen
- Siedlungsflächen
- Fließgewässer
- Main
- Wald

Datengrundlage: Flächenbilanzen 1983 und 1994

Temperatur- und Feuchtemessungen vom 30.06.1995

Kartengrundlage: TK 6225 Würzburg Süd (Ausgabe 1989)

Entwurf und Kartographie: C. Beck 09.1995



MAßSTAB 1:25000

Untersuchungsgebiet 1

Würzburg Heuchelhof - Rottenbauer

Änderungen des Dampfdrucks 1983 - 1994

Dampfdruck in 2m Höhe

Nach Sonnenuntergang

LEGENDE

- Dampfdruckzunahme in hPa
- Dampfdruckabnahme in hPa
- Stadtteilgrenze Heuchelhof
- Strassen
- Siedlungsflächen
- Fließgewässer
- Main
- Wald

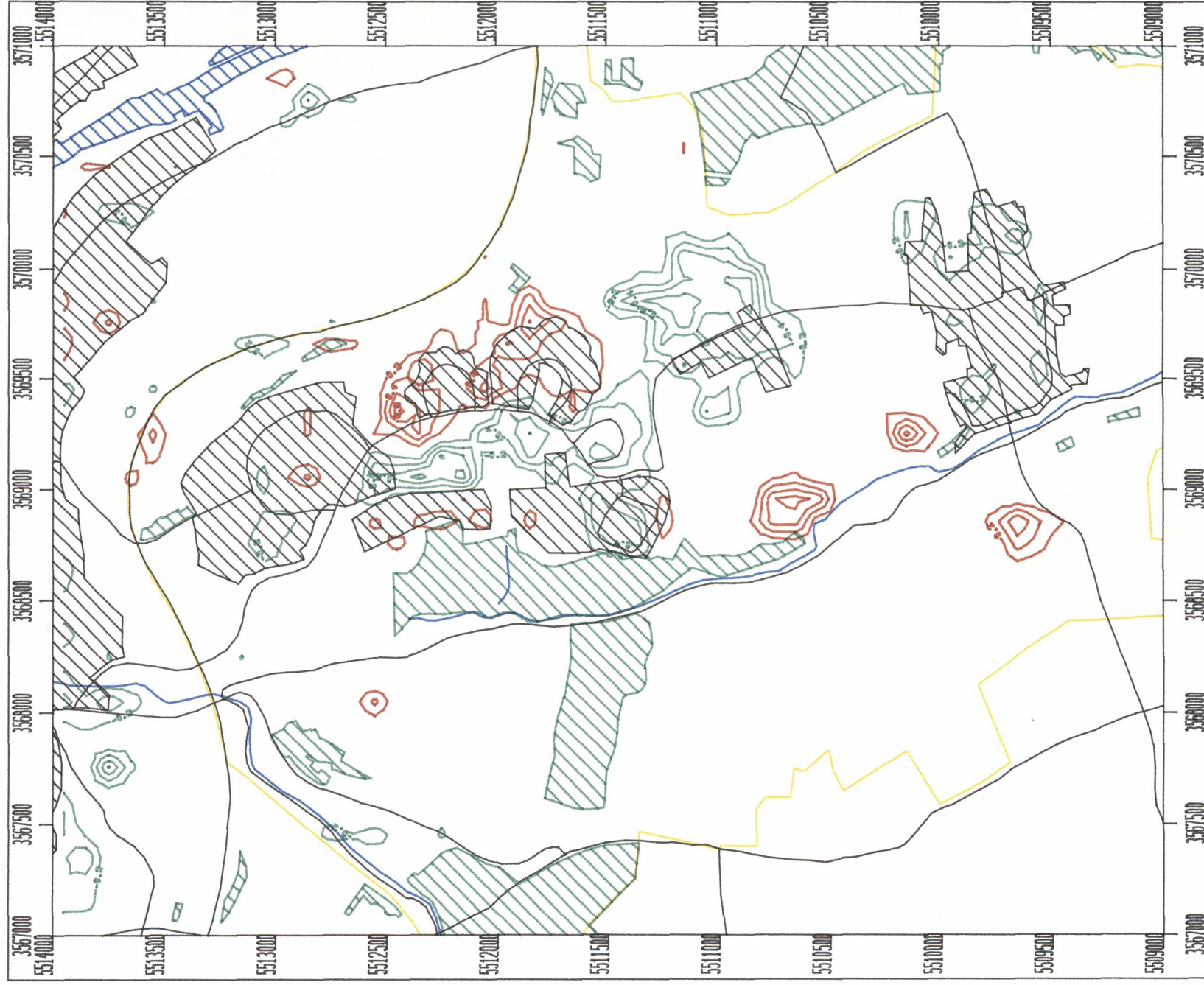
Datengrundlage: Flächenbilanzen 1983 und 1994

Temperatur- und Feuchtemessungen vom 30.06.1995

Kartengrundlage: TK 6225 Würzburg Süd (Ausgabe 1989)

Entwurf und Kartographie: C. Beck 09.1995

MAßSTAB 1:25000



Untersuchungsgebiet 2 Würzburg Lengfeld

Temperaturveränderungen 1983 - 1994
Lufttemperatur in 2m Höhe
Vor Sonnenaufgang

LEGENDE

- Temperaturzunahme in ° Celsius
- Temperaturabnahme in ° Celsius
- Stadtteilgrenzen
- Strassen
- Siedlungsflächen
- Fließgewässer
- Stehende Gewässer
- Wald

Datengrundlage: Flächenbilanzen 1983 und 1994

Temperaturmessungen vom 30.06.1995

Kartengrundlage: TK 6125 Würzburg Nord (Ausgabe 1994)

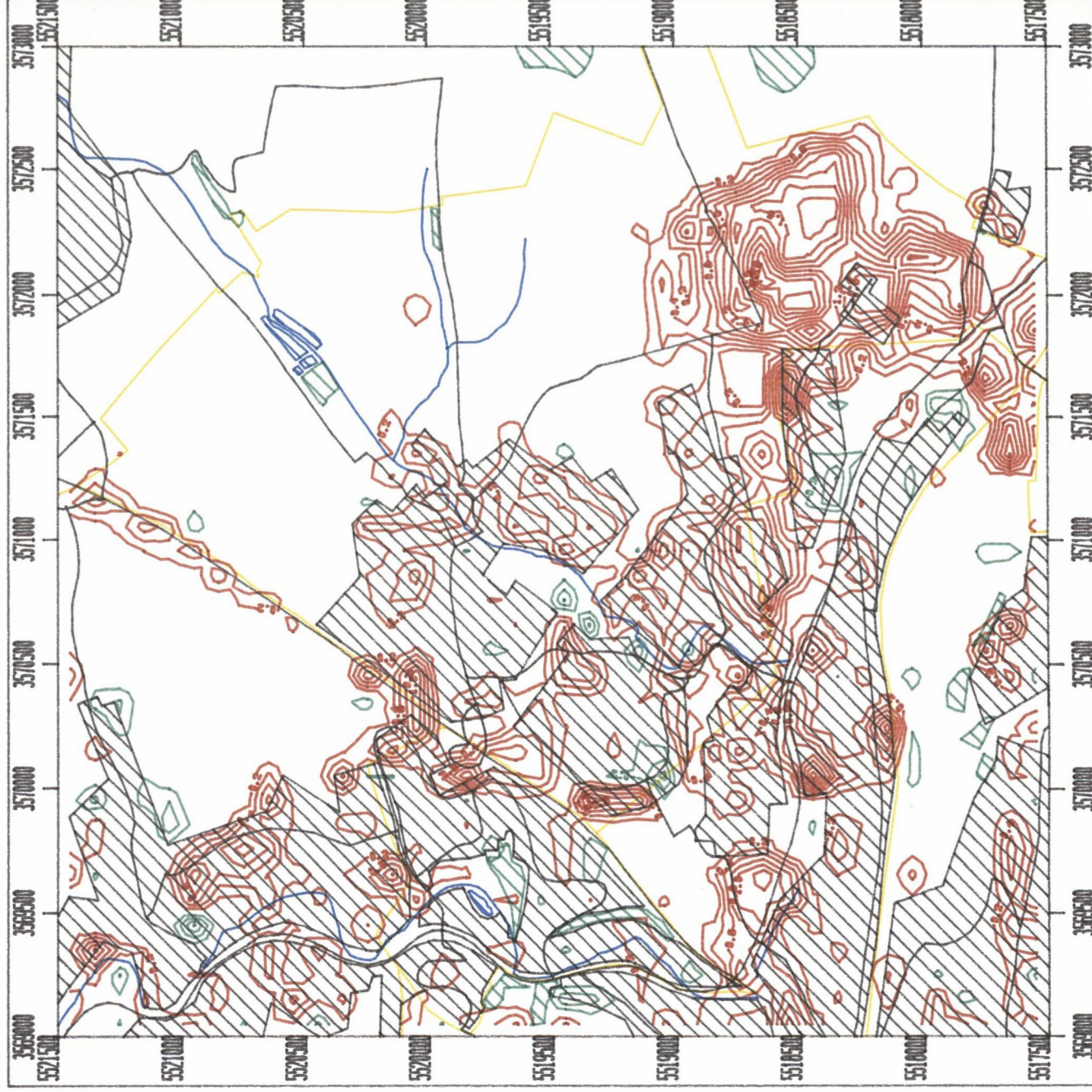
TK 6126 Dettelbach (Ausgabe 1989)

TK 6225 Würzburg Süd (Ausgabe 1989)

TK 6226 Kitzingen (Ausgabe 1994)

Entwurf und Kartographie: C. Beck 09.1995

MAPSTAB 1:25000



Untersuchungsgebiet 2 Würzburg Lengfeld

Änderungen des Dampfdrucks 1983 - 1994
Dampfdruck in 2m Höhe
Mittags

LEGENDE

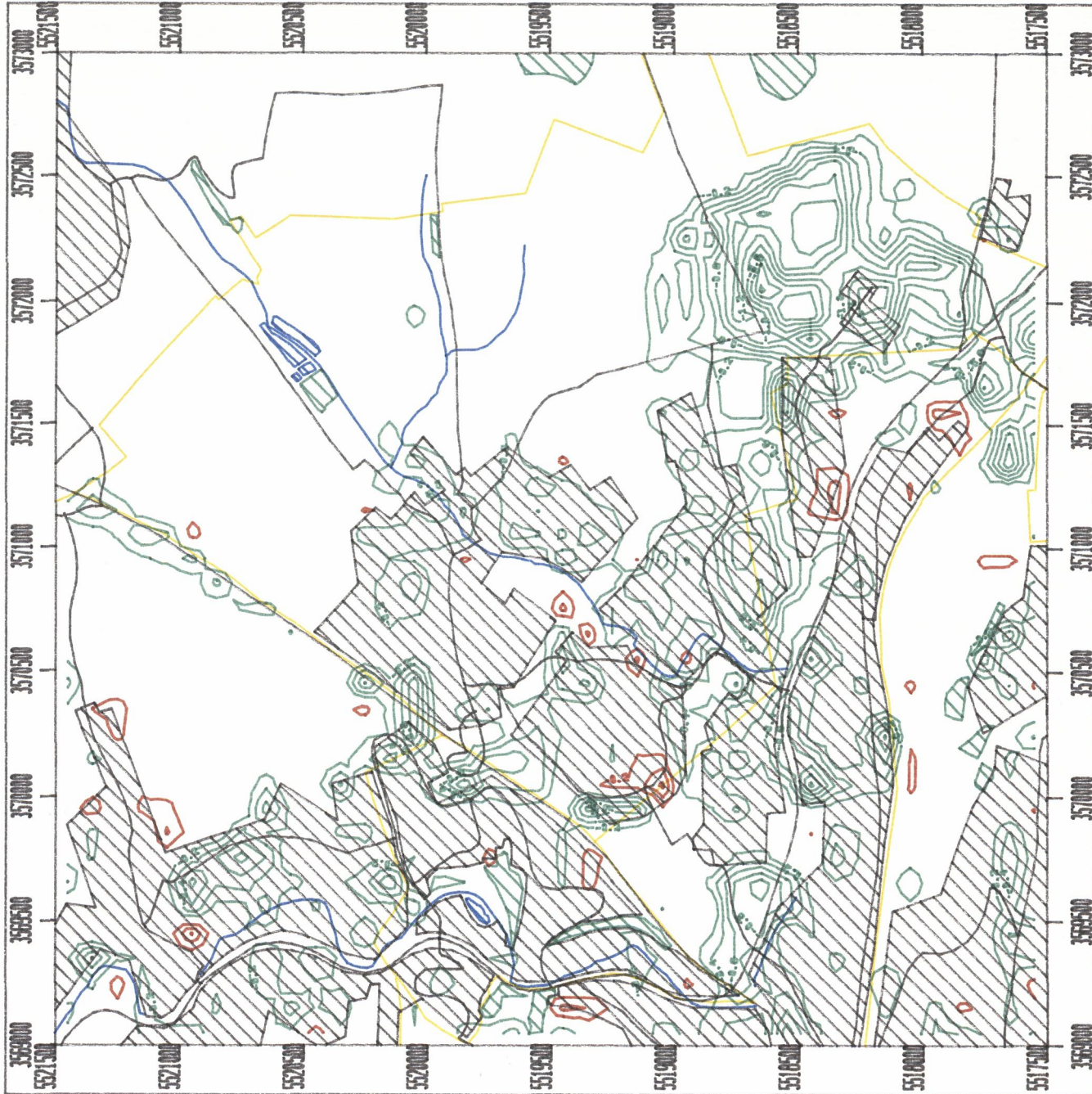
- Dampfdruckzunahme in hPa
- Dampfdruckabnahme in hPa
- Stadtteilgrenzen
- Strassen
- ▨ Siedlungsflächen
- Fließgewässer
- ▨ Stehende Gewässer
- ▨ Wald

Datengrundlage: Flächenbilanzen 1983 und 1994
Temperatur- und Feuchtemessungen vom 30.06.1995

Kartengrundlage: TK 6125 Würzburg Nord (Ausgabe 1994)
TK 6126 Dettelbach (Ausgabe 1989)
TK 6225 Würzburg Süd (Ausgabe 1989)
TK 6226 Kitzingen (Ausgabe 1994)

Entwurf und Kartographie: C. Beck 09.1995

MAPSTAB 1:25000



Untersuchungsgebiet 2 Würzburg Lengfeld

Änderungen des Dampfdrucks 1983 - 1994
Dampfdruck in 2m Höhe
Nach Sonnenuntergang

LEGENDE

- Dampfdruckzunahme in hPa
- Dampfdruckabnahme in hPa
- Stadtteilgrenzen
- Strassen
- ▨ Siedlungsflächen
- Fließgewässer
- ▨ Stehende Gewässer
- ▨ Wald

Datengrundlage: Flächenbilanzen 1983 und 1994

Temperatur- und Feuchtemessungen vom 30.06.1995

Kartengrundlage: TK 6125 Würzburg Nord (Ausgabe 1994)

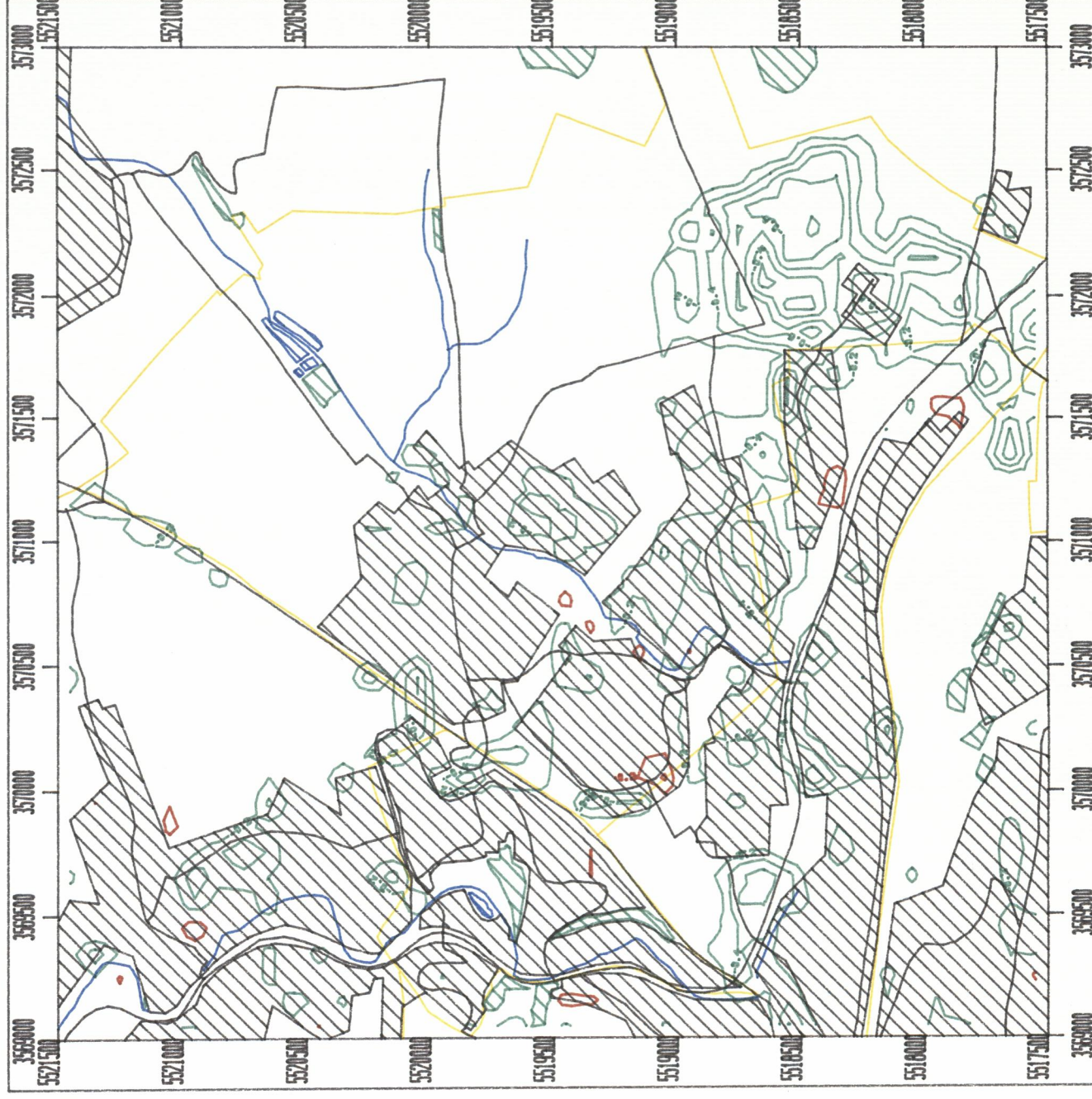
TK 6126 Dettelbach (Ausgabe 1989)

TK 6225 Würzburg Süd (Ausgabe 1989)

TK 6226 Kitzingen (Ausgabe 1994)

Entwurf und Kartographie: C. Beck 09.1995

MAPSTAB 1:25000



C - Literaturverzeichnis

- ADAM, K. (1985): Die Stadt als Ökosystem. - In: Geographische Rundschau 37 (5): 214-225
- ADAM, K. (1988): Stadtökologie in Stichworten. - Unterägeri (Verlag Ferdinand Hirt)
- ALEXANDER, J. (1994): Bewertung von Klima und Luft bei Umweltverträglichkeitsprüfungen. - In: Meteorologische Zeitschrift (N.F.) 3: 111-115
- AUER, A. H. (1978): Correlation of land use and cover with meteorological anomalies. - In: Journal of applied meteorology 17: 636-643
- BAHRENBURG, G., E. GIESE u. J. NIPPER (1990): Statistische Methoden in der Geographie 1. - Stuttgart (Verlag B. G. Teubner)
- BARSCH, H. u. K. BILLWITZ, Hrsg. (1990): Geowissenschaftliche Arbeitsmethoden. - Thun und Frankfurt/Main (Verlag Harri Deutsch)
- BAUMGARTNER, A., H. MAYER u. E.-M. NOACK (1985): Untersuchung des Einflusses von Bebauung und Bewuchs auf das Klima und die lufthygienischen Verhältnisse in bayerischen Großstädten. Abschlußbericht zum Teilprogramm "Thermalkartierungen". - München
- BECKRÖGE, W. u. P. STOCK (1988): Stadtklimatologie - Neue Erkenntnisse für die Stadtplanung. - In: Bauwelt 97 (12): 470-473
- BERNATZKY, A. (1970): Grünflächen und Stadtklima. - In: Städtehygiene 21 (6): 131-135
- BRAHE, P. (1969): Klimatische Auswirkungen von Gehölzen auf umbauten Stadtplätzen. - In: Das Gartenamt (2): 61-70
- BRÜNDL, W., H. MAYER u. A. BAUMGARTNER (1986): Untersuchung des Einflusses von Bebauung und Bewuchs auf das Klima und die lufthygienischen Verhältnisse in bayerischen Großstädten. Abschlußbericht zum Teilprogramm "Klimamessungen München". - München
- BRÜNDL, W. u. E.-M. NOACK (1983): Stadtklima Bayern - Die Wirkung stadtnaher Wälder bei einer spätsommerlichen Hochdruckwetterlage auf das Klima in München. - In: Ann. d. Meteorol. (Neue Folge) (20): 66-67

- BUCHHOLZ, A. (1985): Methoden zur Flächenbilanzierung, Feststellung der Versiegelung, Verfahren zur Bewertung der Lebensqualität. - In: DIFU-Materialien 1/86: 83-103
- DITTMANN, C. (1982): Klimaökologische und lufthygienische Untersuchungen im Raum Regensburg. - München
- ERIKSEN, W. (1964a): Beiträge zum Stadtklima von Kiel. - Schriften d. Geogr. Inst. d. Univ. Kiel 22 (1)
- ERIKSEN, W. (1964b): Das Stadtklima, seine Stellung in der Klimatologie und Beiträge zu einer witterungsklimatologischen Betrachtungsweise. - In: Erdkunde 18 (4): 257-266
- ERIKSEN, W. (1971): Die stadtklimatischen Konsequenzen städtebaulicher Entwicklung. - In: Städtehygiene 22 (11): 259-262
- ERIKSEN, W. (1976): Die städtische Wärmeinsel. - In: Geographische Rundschau 28 (9): 368-373
- ERIKSEN, W. (1983): Die Stadt als urbanes Ökosystem. - Paderborn (Verlag Ferdinand Schöningh)
- FEZER, F. (1976): Wieweit verbessern Grünflächen das Siedlungsklima?. - In: Ruperto Carola (57): 77-79
- FEZER, F. (1982): The influence of building and location on the climate of settlements. - In: Energy and Buildings (4): 91-97
- FEZER, F. (1990): Climatic change after regeneration in the oldest quarter of Heidelberg. - In: Landscape and urban planning 19: 47-54
- FEZER, F. u. H. KARRASCH (1985): Stadtklima. - In: Spektrum der Wissenschaft (8): 66-81
- FINKE, L. (1978): Vom innerstädtischen Grün wird zuviel erwartet. - In: Umschau 78 (8): 243-244
- FLEMMING, G. (1990): Klima - Umwelt - Mensch. - Jena (VEB Gustav Fischer Verlag)
- GEHRKE, A. (1982): Klimaanalyse Stadt Duisburg. - Duisburg
- GEHRKE, A., W. NÜBLER u. W. WEISCHET (1977): Oberflächen- und Lufttemperatur in Abhängigkeit von der Baukörperstruktur. - In: Ann. d. Meteorol. (Neue Folge) (12): 193-196

- GEIGER, R. (1961): Das Klima der bodennahen Luftschicht. - Braunschweig (Verlag Friedr. Vieweg & Sohn)
- GERTH, W.-P. (1986): Klimatische Wechselwirkungen in der Raumplanung bei Nutzungsänderungen. - Offenbach am Main (Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 171)
- GERTH, W.-P. (1987): Anwendungsorientierte Erstellung großmaßstäbiger Klimateignungskarten für die Regionalplanung. - Offenbach am Main (Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 173)
- GERTIS, K. u. U. WOLFSEHER (1977): Veränderung des thermischen Mikroklimas durch Bebauung. - In: Gesundheits-Ingenieur 98 (1/2): 10
- GOLDREICH, Y. (1984): Urban topoclimatology. - In: Progress in Physical Geography 8 (3): 336-364
- GOßMANN, H. u. D. AHRENS (1978): Wechselwirkungen zwischen Luft- und Oberflächentemperaturen im Tagesgang in Abhängigkeit von der Oberflächenart und der Lage im Relief. - In: Bundesministerium für Forschung und Technologie, Forschungsbericht W78-04, Eggenfelden-Leopoldshofen: 197-206
- GOßMANN, H. (1983): Liefern Satelliten-Thermalaufnahmen einen Beitrag zur Klimaforschung im Mesoscale?. - In: Ann. d. Meteorol. (Neue Folge) (20): 36-37
- GOßMANN, H., M. LEHNER u. P. STOCK (1981): Wärmekarten des Ruhrgebietes. - In: Geographische Rundschau 33 (12): 556-562
- GRÄTZ, A., G. JENDRITZKY u. U. SIEVERS (1992): Modellierung des Bioklimas zu Stadtplanungszwecken. - In: Ann. d. Meteorol. (28): 20-22
- HASE, E. (1990): Die Raum-zeitlich differenzierte thermische und hygrische Situation im Stadtgebiet von Augsburg. - In: Augsburger Geographische Hefte 9: 29-75
- HASSELBERGER, K. (1984) Über die Windverhältnisse in der Stadt Würzburg. - Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Würzburg

- HAVLIK, D. (1981): Großstädtische Wärmeinsel und Gewitterbildung - Ein Beispiel anthropogener Klimamodifikation. - In: Aachener Geographische Arbeiten 14: 91-109
- HELBIG, A. (1987): Beiträge zur Meteorologie der Stadtatmosphäre. Abh. d. Meteorologischen Dienstes der DDR, Berlin
- HERTIG, J.-A. (1984): Simulation of urban heat island. - In: Züricher Geographische Schriften 14: 91
- HÖSCHELE, K. (1977): Konkurrierende Gesichtspunkte der Zielvorstellungen für das Stadt- und Landschaftsklima. - In: Ann. d. Meteorol. (Neue Folge) (12): 197-200
- HOFMANN, G. (1967): Mikrometeorologie. - In: Ann. d. Meteorol. (Neue Folge) (3): 139-145
- HORBERT, M. u. A. KIRCHGEORG (1980): Stadtklima und innerstädtische Freiräume am Beispiel des Großen Tiergartens in Berlin. - In: Bauwelt 67: 270-275
- HORBERT, M., A. KIRCHGEORG u. A. von STÜLPNAGEL (1984): On the method for charting the climate of an entire large urban area. - In: Energy and Buildings (7): 109-116
- HORBERT, M., A. KIRCHGEORG u. A. von STÜLPNAGEL (1986): Klimaforschung in Ballungsgebieten. - In: Geographische Rundschau 38 (2): 71-80
- JACOBET, J. (1986): Stadtklimatologie von Augsburg unter besonderer Berücksichtigung der lufthygienischen Situation sowie des Lärms. - Augsburger Geographische Hefte 6
- JACOBET, J. (1990): Neuere Daten und Fakten zum Stadtklima von Augsburg. - In: Augsburger Geographische Hefte 9: 1-28
- JACOBET, J. (1991): Bedeutung eines stadtklimatologischen Gutachtens für die Stadtplanung und Stadtentwicklung. - In: Öff. Gesundh.-Wes. 53: 424-427
- JENDRITZKY, G. (1983): Die thermische Komponente im Bioklima einer Stadt. - In: Ann. d. Meteorol. (Neue Folge) (20): 110-112

- JENDRITZKY, G. (1984): Bioclimatic maps of heat and cold stress of man. - In: Züricher Geographische Schriften 14: 101-102
- JENDRITZKY, G. (1993): Das Bioklima als Gesundheitsfaktor. - In: Geographische Rundschau 45 (2): 107-114
- JENDRITZKY, G., W. SÖNNING u. H. J. SWANTES (1977): Ein Verfahren zur bioklimatischen Bewertung des thermischen Milieus. - In: Ann. d. Meteorol. (Neue Folge) (12): 209-210
- KARRASCH, H. (1992a): Ergebnisse der Bioindikation im Vergleich zu instrumentellen Beobachtungen bei Untersuchungen zum Stadtklima von Heidelberg. - In: Ann. d. Meteorol. (Neue Folge) (28): 25-27
- KARRASCH, H. (1992b): Land use parameters and bioindication as tools in the recognition and prediction of urban climatic effects. - In: Wiss. Ber. d. Inst. f. Meteorologie u. Klimaforschung d. Univ. Karlsruhe (16): 106-115
- KATZSCHNER, L. (1983): Wirkung der Baustruktur auf das kleinräumige Klima einer Stadt. - In: Ann. d. Meteorol. (Neue Folge) (20): 54-56
- KATZSCHNER, L. (1986): Stadtstruktur und Stadtklima. - In: Freiburger Geographische Hefte 26: 42-56
- KATZSCHNER, L. (1988): Einbindung von Klimauntersuchungen in die Stadt- und Freiraumplanung. - In: Universität München - Meteorologisches Institut, Wissenschaftliche Mitteilungen 61: 65-76
- KERSCHGENS, M. J. (1983): An energetic view of urban atmosphere. - In: Ann. d. Meteorol. (Neue Folge) (20): 20-21
- KERSCHGENS, M. J. (1988): Praktische Anwendung von Stadtklimamodellen. - In: Universität München - Meteorologisches Institut, Wissenschaftliche Mitteilungen 61: 57-64
- KESSLER, A. (1971): Über den Tagesgang von Oberflächentemperaturen in der Bonner Innenstadt an einem sommerlichen Strahlungstag. - In: Erdkunde 25: 13-20
- KESSLER, A. (1985): Anthropogene Änderungen des Strahlungshaushalts der Erdoberfläche. - In: Erdkunde 39: 175-179

- KESSLER, ANETTE (1993): Ein Beitrag zum subjektiven Klimaempfinden dargestellt an Hand empirischer Untersuchungen in Würzburg. - Zulassungsarbeit am Geographischen Institut der Universität Würzburg
- KIM, H. H. (1992): Urban heat island. - In: Int. J. Remote Sensing 13 (12): 2319-2336
- KRAUS, H. (1983): Meso- und mikroskalige Klima-Systeme. - In: Ann. d. Meteorol. (Neue Folge) (20): 4-7
- KRATZER, A. (1956): Das Stadtklima. - Braunschweig (Verlag Friedr. Vieweg & Sohn)
- KULS, W. (1993): Bevölkerungsgeographie. - Stuttgart (Verlag B. G. Teubner)
- KUTTLER, W. (1985): Stadtklima - Struktur und Möglichkeiten zu seiner Verbesserung. - In: Geographische Rundschau 37 (5): 226-233
- KUTTLER, W. (1993): Planungsorientierte Stadtklimatologie. - In: Geographische Rundschau 45 (2): 95-106
- LANDSBERG, H. E. (1981): The urban climate. - New York (Academic press, inc.)
- LEE, D. O. (1984): Urban climates. - In: Progress in Physical Geography 8 (1): 1-31
- LÖFFLER, E. (1985): Geographie und Fernerkundung. - Stuttgart (Verlag B. G. Teubner)
- LORENZ, D. (1973): Meteorologische Probleme bei der Stadtplanung. - In: Baupraxis (9): 57-62
- MAHLER, G. u. P. STOCK (1977): Oberflächen-Temperaturverhalten städtischer Flächen. - In: Bauwelt 68 (36): 1218-1221
- MAROTZ, G. A. a. J. C. COINER (1973): Acquisition and characterization of surface material data for urban climatological studies. - In: Journal of applied meteorology 12: 919-923
- MAYER, H. (1983): Stadtklima Bayern - Ein anwendungsorientiertes Forschungsvorhaben. - In: Ann. d. Meteorol. (Neue Folge) (20): 24-25
- MAYER, H. u. A. MATZARAKIS (1992): Stadtklimarelevante Kartierungen in München. - In: Ann. d. Meteorol. (Neue Folge) (28): 14-16
- MENZ, G. (1989): Angewandte Bioklimatologie im umweltwissenschaftlichen Bereich. - In: Geographische Rundschau 41 (6): 325-331
- MIESS, M. (1988): Rückwirkungen der Bodenversiegelung auf das Stadtklima. - In: Informationen zur Raumentwicklung (8/9): 529-533

- MÜLLER, K.-H. (1982): Methoden und Ergebnisse stadtökologischer Forschungen am Beispiel Marburg (Lahn). - In: Informationen zur Raumentwicklung (10): 835-845
- MYRUP, L. O. (1969): A numerical model of the urban heat island. - In: Journal of applied meteorology 8: 908-918
- NÜBLER, W. (1979): Konfiguration und Genese der Wärmeinsel der Stadt Freiburg. - Freiburger Geographische Hefte 16
- NULTSCH, W. (1986): Allgemeine Botanik. - Stuttgart (Thieme Verlag)
- NUNEZ, M. a. T. R. OKE (1980): Modeling the urban surface energy balance. In: Geographical Analysis 12 (4): 373-386
- OKE, T. R. (1982): The energetic basis of the urban heat island. - In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 108: 1-24
- OKE, T. R. (1984): Methods in urban climatology. - In: Züricher Geographische Schriften 14: 19-29
- OKE, T. R. (1987): Boundary layer climates. - London (Routledge)
- PESCHKE, G., J. SCHOLZ u. C. SEIDLER (1983): Die Veränderung von Komponenten des Energie- und Wasserhaushaltes durch Pflanzendecken. - In: Ann. d. Meteorol. (Neue Folge) (27): 87-88
- PLENDL, H. (1984): Ausgewählte Aspekte zum klimatologischen Wirkungsgefüge des Lebensraumes Stadt, Teil I: Die Wechselwirkung von Strahlung und thermischem Verhalten typischer städtischer Oberflächen an einem sommerlichen Strahlungstag am Beispiel der Stadt Würzburg. - Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Würzburg
- REUTER, U. (1988): Meteorologie in der Stadtplanung. - In: Universität München - Meteorologisches Institut, Wissenschaftliche Mitteilungen 61: 50-56
- ROBEL, F. (1975): Vegetation, Topographie und Stadtklima. - In: Baupraxis (7): 29-32
- ROTH, D. (1979): Klimahygienische Aspekte des Stadtklimas. - In: Landschaft + Stadt 11 (1): 13-17
- SCHARLAU, K. (1950): Einführung eines Schwülemaßstabes und Abgrenzung von Schwülezeiten durch Isohygrothermen. - In: Erdkunde 4: 188-201

- RÜCKERT, H. (1984): Ausgewählte Aspekte zum klimatologischen Wirkungsgefüge des Lebensraumes Stadt, Teil II: Das Oberflächentemperaturverhalten von Block- und Zeilenbauweise im Würzburger Stadtteil Zellerau an einem sommerlichen Strahlungstag. - Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Würzburg
- SCHIRMER, H. (1978): Das Klima sollte bei der Raumplanung berücksichtigt werden. - In: Umschau 78 (9): 281-283
- SCHLIEPHAKE, K. u. E. KITZ (1987): Würzburg-Heuchelhof: Entwicklung, Strukturen und Mobilität in einem neuen Wohngebiet. - In: Würzburger Geographische Arbeiten 68: 175-205
- SCHMITT, B. (1983): Stadtökologische Untersuchungen 1. - Stadtplanungsamt Würzburg
- SCHMITT, B. (1990): Das kommunale Informationssystem KIS - ein geographisches Informationssystem auf der Basis von Personalcomputern. - Würzburger Geographische Arbeiten 76
- STADT WÜRZBURG, Hrsg. (1995): Planen - Bauen - Leben. - Würzburg
- STATISTISCHES BUNDESAMT (1995): Statistisches Jahrbuch 1995 für die Bundesrepublik Deutschland. - Wiesbaden
- STEIN, N. (1979): Zentrale Forschungsfelder einer ökologisch orientierten Stadt klimatologie: Strahlungs-, Energie- und Wärmehaushalt. - In: Landschaft + Stadt 11 (3): 99-110
- STIEMER, S. F. (1977): Windumströmung von Gebäuden und Gebäudeklima. - In: FRANKE, E. (Hrsg.): Stadtklima, 77-111
- STOCK, P. u. W. BECKRÖGE (1983): Synthetische Klimafunktionskarten für das Ruhrgebiet. - In: Ann. d. Meteorol. (Neue Folge) (20): 57-58
- SWAID, H. (1993): Urban climate effects of artificial heat sources and ground shadowing by buildings. - In: International Journal of climatology 13: 797-812
- TEICHTWEIER, C. (1983): Die thermischen und hygrischen Verhältnisse im Stadtgebiet von Würzburg. - Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Würzburg

- TERJUNG, W. H. a. P. A. O'ROURKE (1980): Influences of physical structures on urban energy budgets. - In: *Boundary-Layer Meteorology* (19): 421-439
- TERJUNG, W. H. a. P. A. O'ROURKE (1981): Relative influence of vegetation on urban energy budgets and surface temperatures. - In: *Boundary-Layer Meteorology* (21): 255-263
- THEVES, B. (1975): Möglichkeiten zur Beurteilung der thermischen und lufthygienischen Auswirkungen verschiedener Baustrukturen aus Modellversuchen. - In: *Landschaft + Stadt* (3): 122-135
- TUROWSKI, E., M. TÖPFER u. A. RINKE (1992): Thermische Verhältnisse ausgewählter städtischer Strukturen in Berlin. - In: *Ann. d. Meteorol.* (Neue Folge) (28): 23-24
- VDI-KOMMISSION REINHALTUNG DER LUFT, Hrsg. (1988): *Stadtklima und Luftreinhaltung*. - Berlin (Springer-Verlag)
- VENT-SCHMIDT, V. (1981): Eine synthetische Karte der lokalklimatischen Struktur im Großraum Pforzheim. - In: *Natur und Landschaft* 56 (1): 8-11
- WANNER, H. (1984): Methods in applied topoclimatology. - In: *Züricher Geographische Schriften* 14: 5-17
- WEISCHET, W. (1956): Die räumliche Differenzierung klimatologischer Betrachtungsweisen: Ein Vorschlag zur Gliederung der Klimatologie und zu ihrer Nomenklatur. - In: *Erdkunde* 10: 109-122
- WEISCHET, W. (1979): Problematisches über die städtische Wärmeinsel und die Notwendigkeit einer Baukörperklimatologie. - In: *Siedlungsgeographische Studien* 1979: 407-423
- WEISCHET, W. (1988): *Einführung in die Allgemeine Klimatologie*. - Stuttgart (Verlag B. G. Teubner)
- WILMERS, F. (1983): Geländekartierung als Grundlage für mikrometeorologische Standortsbewertungen gezeigt an stadtklimatologischen Problemen. - In: *Ann. d. Meteorol.* (Neue Folge) (20): 68-69
- WILMERS, F. (1985): Ansprüche des Menschen an seine Klima-Umwelt. - In: *Landschaft + Stadt* 17 (1): 30-42

- WILMERS, F. (1988): Green in urban climate. - In: Grefen, K. a. J. Löbel (eds.),
Environmental Meteorology: 359-379
- ZIMMERMANN, H. (1987): Die Stadt in ihrer Wirkung als Klimafaktor. - In: Promet -
Meteorologische Fortbildung (3/4): 17-24

Ich versichere hiermit, daß ich vorliegende Diplomarbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur angefertigt habe. Alle Tabellen, Abbildungen und Karten wurden, soweit nicht anders angegeben, von mir erstellt.

Würzburg, den 12.11.1995

