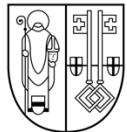


«Citizen Science» Projekt 2025

Krefeld, Deutschland





STADT KREFELD

KREATIV – INNOVATIV – WELTOFFEN

Beauftragt von:

Stadt Krefeld
Stabsstelle Klimaschutz und Nachhaltigkeit
Von-der-Leyen-Platz 1
47792 Krefeld

meteoblue[®]

A Windy.com Company

Durchgeführt von:

meteoblue AG
Greifengasse 38
4058 Basel
Schweiz

1. EINLEITUNG	4
2. METHODIK.....	5
2.1 DATENAUFBEREITUNG	5
2.2 TEMPERATURDIFFERENZEN.....	5
2.2.1 Vergleich mit DWD Daten	5
2.2.2 Vergleich mit der Durchschnittstemperatur der Fahrt	5
2.3 ZUVERLÄSSIGKEIT UND LIMITS	6
2.4 QUALITÄTSKONTROLLE.....	7
3. RÄUMLICHE ANALYSE	8
3.1 MESSFAHRten	8
3.2 RASTERANALYSE	10
3.3 TAGESZEITLICHE UNTERSCHIEDE	12
4. VERGLEICH MIT STATIONÄREN MESSUNGEN	16
4.1 METHODIK.....	16
4.2 ERGEBNISSE	17
5. AUSBLICK	23

1. Einleitung

Im Jahr 2024 wurde in Krefeld ein innovatives Citizen-Science-Projekt ins Leben gerufen, das Bürger aktiv in die Sammlung und Analyse meteorologischer Daten einbindet. Dieses Projekt wurde im Sommer 2025 mit neuen Teilnehmern fortgeführt. Insgesamt 30 Teilnehmer erhielten sogenannte *Meteotracker*, kleine, tragbare Sensoren, die am Fahrradlenker befestigt werden und während der täglichen Fahrten kontinuierlich Temperatur- und weitere Klimadaten erfassen. Unter dem Motto „Messen, wo keine Sensoren verbaut sind“ konnten so auch bislang unbeobachtete Gebiete erfasst werden.

Der Projektzeitraum erstreckte sich von Juli bis einschließlich September, in dem über 100.000 Messwerte anonym in der Cloud gespeichert und von meteoblue detailliert analysiert wurden. Ziel war es, den städtischen Wärmeinseleffekt (Urban Heat Island, UHI) besser zu verstehen und zusätzliche Erkenntnisse zu stationären Messungen und Modellierungen des Stadtklimas in Krefeld zu gewinnen. Dabei kamen innovative Methoden wie die Kombination von mobilen und stationären Messungen, Rasteranalysen sowie tageszeitliche Auswertungen zum Einsatz.

Die Ergebnisse zeigten deutlich, dass urbane Wärmeinseln vor allem in dicht bebauten Stadtzentren auftreten, während Grünflächen wie der Hülser Berg oder der Stadtwald deutlich kühlere Temperaturen aufweisen. Zudem variierte die Intensität des Wärmeinseleffekts je nach Tageszeit und war insbesondere während der Mittags- und Abendstunden am stärksten ausgeprägt. Herausforderungen, etwa durch Abweichungen bei hohen Temperaturen oder begrenzte Datenverfügbarkeit, wurden durch erweiterte Qualitätskontrollen aufgefangen.

Die gesammelten Daten liefern wertvolle Hinweise auf temperaturbedingte Unterschiede in der Stadt, die durch Faktoren wie Bebauungsdichte, Verkehrsaufkommen oder Grünflächen beeinflusst werden. Sie bieten sowohl für Wissenschaft als auch für Stadtplanung wichtige Anknüpfungspunkte, um gezielte Maßnahmen zur Verbesserung des Stadtklimas zu entwickeln – etwa durch die Schaffung zusätzlicher Grünflächen oder klimafreundliche Stadtgestaltung.

Darüber hinaus trägt das Projekt dazu bei, das Bewusstsein der Bürger für Klimafragen zu stärken und den Dialog über die Auswirkungen des Klimawandels im urbanen Raum zu fördern. Durch ihre aktive Mitwirkung werden Bürger zu Mitgestaltern einer nachhaltigen Stadtentwicklung. Das Projekt gilt damit als Vorbild für ähnliche Initiativen und zeigt, wie die enge Zusammenarbeit von Wissenschaft, Politik und Bevölkerung nicht nur lokale, sondern auch globale Klimafragen voranbringen kann.

2. Methodik

2.1 Datenaufbereitung

Die Meteotracker-Geräte erfassen Daten in einem Intervall von etwa 5 Sekunden. Diese hohe Datendichte ist für die Analyse jedoch nicht direkt nutzbar, da sie die Vergleichbarkeit erschwert. Aus diesem Grund wurden die Rohdaten auf ein Intervall von 10 Minuten aggregiert. Diese Aggregation erleichtert nicht nur die Analyse, sondern ist auch notwendig, um die Daten mit den Referenz-Messstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) vergleichen zu können, deren Messwerte ebenfalls in 10-Minuten-Intervallen vorliegen.

Ein weiterer wichtiger Schritt in der Datenaufbereitung war der Ausschluss von Datenpunkten, die über einen längeren Zeitraum an einem festen Ort aufgezeichnet wurden. Diese Filterung wurde durchgeführt, um sicherzustellen, dass nur mobile Messungen in die Analyse einfließen und keine stationären Werte, die die Ergebnisse verfälschen könnten.

Darüber hinaus wurden Temperaturwerte, die mehr als zwei Standardabweichungen über oder unter dem Mittelwert der Messfahrt lagen, als Ausreißer identifiziert und aus dem Datensatz entfernt. Diese Methode stellt sicher, dass extreme Werte, die möglicherweise durch Sensorfehler oder außergewöhnliche Umstände verursacht wurden, die Analyse nicht beeinträchtigen.

2.2 Temperaturdifferenzen

2.2.1 Vergleich mit DWD Daten

Für jeden aggregierten Zeitschritt einer Messfahrt wurde die gemessene Lufttemperatur mit dem entsprechenden Zeitschritt der nächstgelegenen Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verglichen. Die Temperaturdifferenz (ΔT) wurde wie folgt berechnet:

$$\Delta T_i = T_{\text{Meteotracker}_i} - T_{\text{DWD}_i}$$

Hierbei steht i für den jeweiligen Zeitschritt. Zur Analyse wurden die DWD-Stationen in Düsseldorf (01078) und Tönisvorst (05064) herangezogen, die jeweils etwa 10 km von Krefeld entfernt liegen. Dieser Vergleich ermöglichte es, Abweichungen zwischen den mobilen Messgeräten und den stationären Wetterstationen zu quantifizieren und zu bewerten.

2.2.2 Vergleich mit der Durchschnittstemperatur der Fahrt

Ein weiterer Ansatz zur Berechnung der Temperaturdifferenzen bestand darin, die Durchschnittstemperatur jeder einzelnen Fahrradtour als Referenzwert heranzuziehen. Dieser Durchschnittswert wurde von den Messdaten der Fahrt subtrahiert, um die Delta-Temperatur (ΔT) für jeden Moment der Tour zu bestimmen.

$$\Delta T_i = T_{\text{Meteotracker}_i} - T_{\text{Durchschnitt pro Fahrt}}$$

Dieser Ansatz ermöglichte eine detaillierte Analyse der Temperaturabweichungen während einer einzelnen Messfahrt und lieferte wertvolle Einblicke in lokale Schwankungen des Mikroklimas. Ein Nachteil dieses Ansatzes zur Berechnung der Delta-Temperatur besteht jedoch darin, dass die Dauer und die Fahrstrecke der einzelnen Messfahrten variieren können.

Bei kurzen Fahrten, die auf ein begrenztes Gebiet mit geringer Temperaturvariabilität beschränkt sind, ergeben sich oft Delta-Temperaturen nahe 0 K. Diese geringen Abweichungen spiegeln lediglich die Temperaturunterschiede entlang der spezifischen Route wider, bieten jedoch keine verlässlichen Hinweise auf den Wärmeinseleffekt der gesamten Umgebung, in der die Messfahrt durchgeführt wurde.

Dadurch wird die Interpretation der Delta-Temperaturen eingeschränkt, da sie in solchen Fällen keine allgemeingültigen Aussagen über die urbane Wärmeinsel oder größere klimatische Muster in der untersuchten Region zulassen. Eine Erweiterung des Ansatzes, etwa durch die Einbeziehung zusätzlicher Datenquellen oder die Berücksichtigung der räumlichen Kontextfaktoren, könnte diese Limitationen reduzieren und eine umfassendere Bewertung ermöglichen.

2.3 Zuverlässigkeit und Limits

Während der Analyse offenbarten die Messungen der *Meteotracker*-Geräte einige Herausforderungen, die ihre Zuverlässigkeit unter bestimmten Bedingungen infrage stellen.

Abbildung 2.1 visualisiert alle aufgezeichneten Messungen und vergleicht diese mit den Daten der DWD-Station in Düsseldorf. In den meisten Fällen zeigten die Tracker eine gute Übereinstimmung mit den DWD-Messungen (hier exemplarisch für Düsseldorf, mit ähnlichen Ergebnissen für Tönisvorst). Eine deutliche Ausnahme bildeten jedoch die Monate August und ein Großteil des Septembers, in denen die Tracker tendenziell höhere Temperaturen als die DWD-Stationen registrierten.

Ein genauerer Blick auf die Abweichungen zeigt, dass diese vor allem bei hohen Lufttemperaturen auftreten. Diese Hypothese wird durch den Rückgang der Differenzen im späteren September gestützt, als die allgemeinen Lufttemperaturen sanken. Diese Beobachtungen lassen vermuten, dass die *Meteotracker* unter spezifischen klimatischen Bedingungen, wie intensiver Sonneneinstrahlung oder hoher Umgebungstemperatur, systematische Messabweichungen zeigen.

Um die Validität der Daten zu sichern, wurde eine erweiterte zweite Qualitätskontrolle durchgeführt. Dabei wurden potenzielle Fehlerquellen wie Überhitzung der Geräte und ungewöhnliche Umgebungseinflüsse analysiert. Eine Optimierung der Datenauswertung wurde implementiert, um die Messergebnisse robuster und aussagekräftiger zu gestalten.

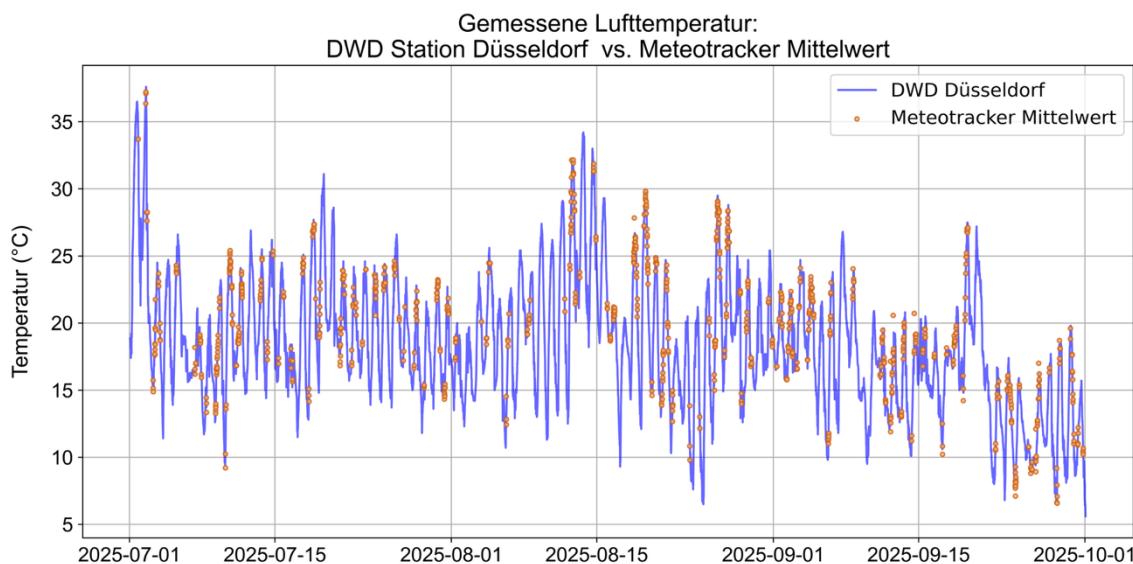


Abbildung 2.1: Gemessene Lufttemperatur an der DWD-Station in Düsseldorf in Blau und Meteotracker-Messungen als Mittelwert in Orange.

2.4 Qualitätskontrolle

Zusätzlich zu der in Kapitel 2.1 beschriebenen Qualitätskontrolle, bei der Daten ober- und unterhalb von zwei Standardabweichungen während einer Messfahrt herausgefiltert werden, wird hier eine weiterführende Qualitätskontrolle eingeführt, die auf den Delta-Temperaturen basiert.

Basierend auf den Temperaturdifferenzen zwischen den Meteotrackern und der DWD-Station (siehe Abbildung 2.2) wurde eine weitere Regel definiert, da hohe Delta-Temperaturen von bis zu 20 K als unrealistisch einzustufen sind. Solche Werte sind auf die in Kapitel 2.3 beschriebenen systematischen Probleme oder Messfehler zurückzuführen.

In dieser erweiterten Kontrolle werden zunächst alle Werte ausgeschlossen, die außerhalb von ± 2.0 Standardabweichungen (σ) um den Mittelwert der Temperaturdifferenzen liegen. Diese Datenpunkte gelten aufgrund ihrer Abweichung als potenzielle Messfehler und werden aus dem Datensatz entfernt, wie in

Abbildung 2.1 verdeutlicht. Für die unteren Werte der Temperaturdifferenzen wurde jedoch festgestellt, dass die Grenze des berechneten Bereichs realistisch ist und keine Daten verworfen werden mussten. Die positiven Temperaturdifferenzen hingegen wurden wie folgt begrenzt:

$$\text{Limit} = \text{Mittelwert} \pm 2 * \sigma$$

Mit einer Standardabweichung σ von 2.15°C und einem Mittelwert der Temperaturdifferenz von 0.001°C (basierend auf den Vergleichsdaten der DWD-Station Düsseldorf) ergibt sich ein Grenzwert von 4.30°C . Werte oberhalb dieses Limits wurden als fehlerhaft eingestuft und aus dem Datensatz entfernt.

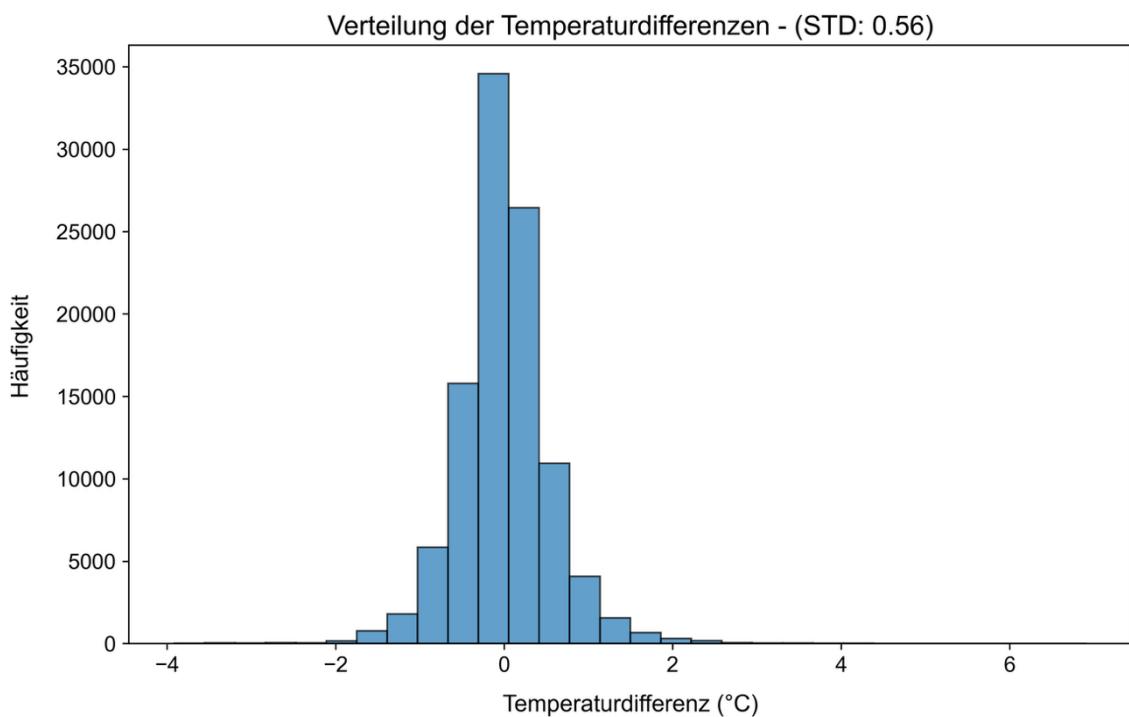


Abbildung 2.2: Histogramm aller Delta-Temperaturen (basierend auf der DWD-Station in Düsseldorf) nach Durchführung der Qualitätskontrolle.

3. Räumliche Analyse

3.1 Messfahrten

Die räumliche Analyse der Temperaturdifferenzen, berechnet anhand der Daten von den DWD-Stationen Düsseldorf und Tönisvorst sowie der Mittelwerte einzelner Messfahrten, wurde auf einer Karte visualisiert.

Die folgende Karte zeigt die Stadt Krefeld und ihre unmittelbare Umgebung, wo der Großteil der Daten erhoben wurde. Ergänzend dazu wurden auch Messfahrten außerhalb dieses Bereichs durchgeführt, die bis zum Flughafen Düsseldorf im Osten, nach Kempen im Westen, zum Hülser Berg im Norden und nach Willich im Süden reichten (siehe Abbildung 3.1).

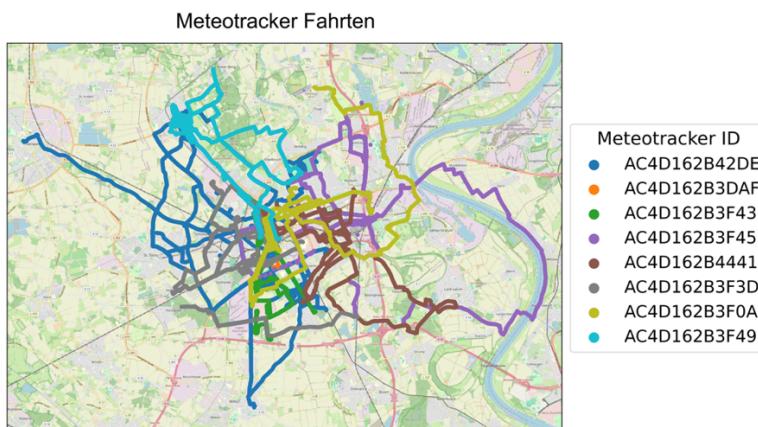


Abbildung 3.1: Die längsten Messfahrten für verschiedene Meteotracker (unterschiedliche Farben).

Die Visualisierung verdeutlicht das städtische Wärmeinselphänomen (Urban Heat Island, UHI) in einzelnen Bereichen. Der Vergleich der Temperaturdifferenzen anhand der Referenzwerten der DWD-Stationen (siehe Abbildung 3.5) zeigt einen leichten Wärmeinseleffekt: Im Stadtzentrum überwiegen positive Abweichungen, während in den Randgebieten überwiegend negative Werte auftreten. Teilweise werden diese Muster jedoch durch Messfahrten mit außergewöhnlich hohen oder niedrigen Temperaturwerten überlagert.

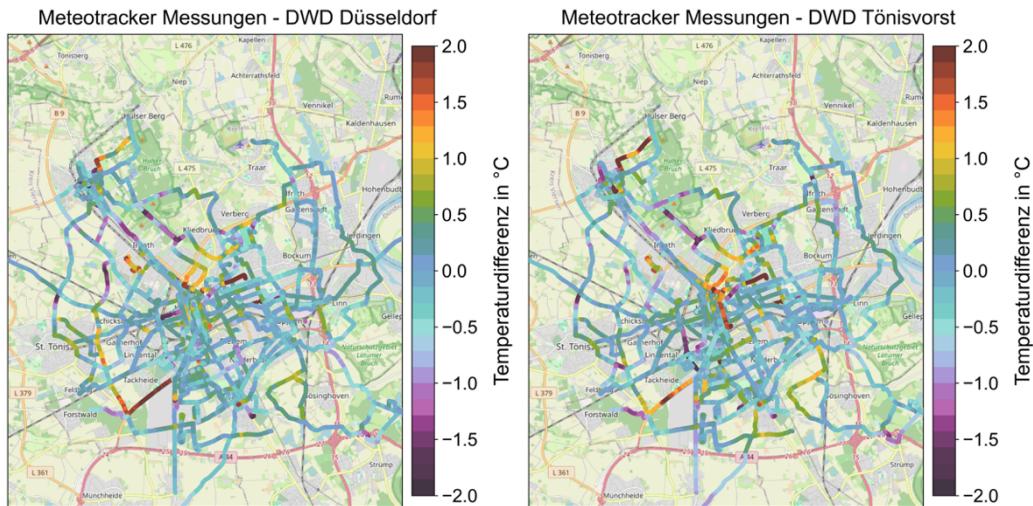


Abbildung 3.2: Farbkodierte ΔT , die den Unterschied zwischen den Meteotracker-Messungen und den DWD-Messungen zeigen (links: DWD-Station Düsseldorf, rechts: DWD-Station Tönisvorst).

Der Unterschied der Delta-Temperaturen zwischen den beiden Referenzstationen Düsseldorf und Tönisvorst ist dabei relativ gering. Insgesamt ergibt sich ein Wärmeinseleffekt von bis zu +2 K im Innenstadtbereich von Krefeld, während im Bereich des Hülser Berg Werte von bis zu -2 K gemessen wurden.

Trotz dieser Erkenntnisse ist die Visualisierung anhand der Messfahrten nicht ohne Einschränkungen. Datenpunkte entlang der Fahrtstrecken können sich überlappen, was die Interpretation erschwert. Eine präzisere Methode stellt die rasterbasierte Darstellung dar, bei der alle gemessenen Daten innerhalb eines definierten Gitters gemittelt werden (siehe Kapitel 3.2 und 3.3). Diese Methode ermöglicht eine klarere und weniger verzerrte Darstellung räumlicher Temperaturmuster.

Die zweite Analysemethode, die den Vergleich mit der Durchschnittstemperatur der jeweiligen Messfahrt verwendet, ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Die Temperaturdifferenzen liegen überwiegend um 0 °C, wobei einige Ausreißer auftreten, die häufig bei längeren Fahrten beobachtet werden. Diese Ausreißer sind auf die in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Herausforderungen dieser Analysemethode zurückzuführen, insbesondere durch variierende Fahrdauer und -strecken. Eine zuverlässige Anwendung dieser Methode ist jedoch nur möglich, wenn sichergestellt ist, dass die Fahrten einen großen Teil des Stadtgebiets abdecken und während einer Messfahrt sowohl städtische als auch ländliche Bereiche und damit potenzielle Stadt-Land-Temperaturunterschiede (Wärmeinseleffekt) erfasst werden.

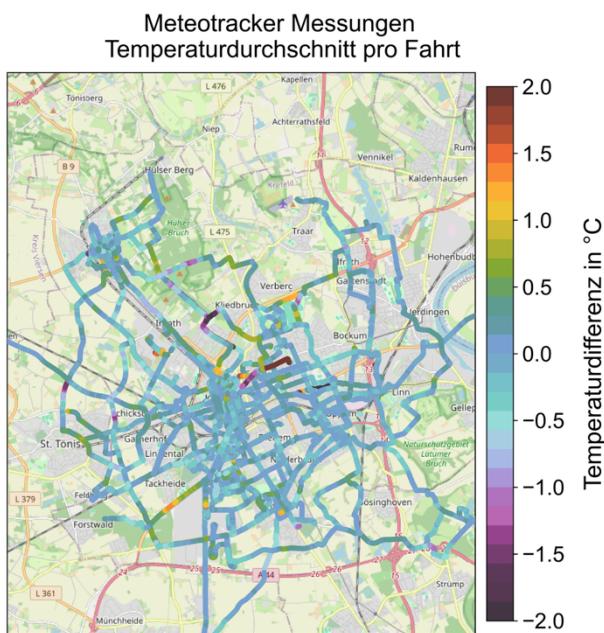


Abbildung 3.3: Farbkodierte ΔT , die den Unterschied zwischen den Meteotracker-Messungen und der durchschnittlichen Lufttemperatur jeder Fahrt zeigen.

Zusammenfassend liefern die Messfahrten wertvolle Einblicke in die räumlichen Temperaturmuster und zeigen erste Anzeichen des städtischen Wärmeinselphänomens. Für eine präzisere Analyse und aussagekräftigere Ergebnisse sollte jedoch auf eine rasterbasierte Darstellung zurückgegriffen werden, die es ermöglicht, die gesammelten Daten konsistenter und umfassender auszuwerten.

3.2 Rasteranalyse

Um die in Kapitel 3.1 beschriebenen Überlappungen der Datenpunkte entlang der Messfahrten zu vermeiden, wurde eine Rasteranalyse durchgeführt. Hierbei wurden die gemessenen Temperaturdifferenzen (ΔT) in ein regelmäßiges Gitter eingeteilt, wobei alle Datenpunkte innerhalb einer Rasterzelle gemittelt wurden. Zur Untersuchung wurden verschiedene Rastergrößen (300 m, 500 m und 1000 m) verwendet, um die optimale Balance zwischen Detailgenauigkeit und Datenrauschen zu finden.

Die Ergebnisse zeigen das städtische Wärmeinselphänomen (Urban Heat Island, UHI) deutlich, unabhängig von der gewählten Rastergröße und Vergleichsstation (siehe Abbildung 3.4). Beim Vergleich mit den DWD-Daten aus Düsseldorf zeigt sich jedoch eine etwas stärker ausgeprägte UHI, was auf die größere Entfernung und die damit verbundenen klimatischen Unterschiede hinweist. Eine Rastergröße von 500 m erwies sich als besonders geeignet, da sie genügend Detailgenauigkeit bietet, um Temperaturmuster präzise darzustellen, ohne durch übermäßiges Rauschen beeinträchtigt zu werden.

Aufgrund der heterogenen Datenverfügbarkeit zwischen den einzelnen Pixeln sind die absoluten Werte sowie Pixel-zu-Pixel-Vergleiche nur eingeschränkt interpretierbar. Der Fokus sollte daher auf dem Gesamtbild liegen, da sowohl eine ausgeprägte räumliche als auch zeitliche Variabilität besteht. Ein direkter Vergleich einzelner Pixel ist nicht sinnvoll, stattdessen sollte die Analyse auf den räumlichen Mustern der gesamten Fläche basieren.

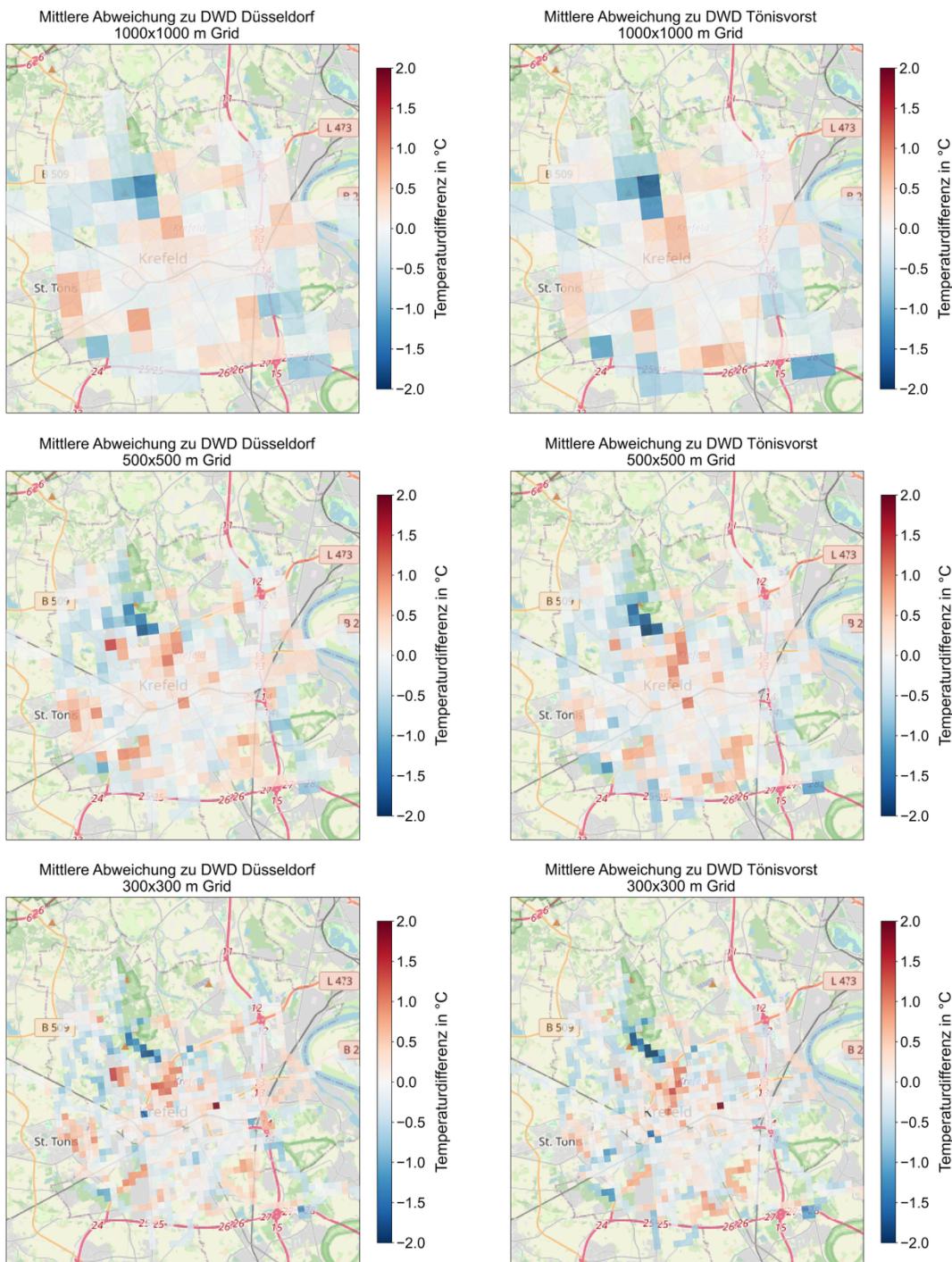


Abbildung 3.4: Regelmäßige Raster der gemittelten ΔT mit Rastergrößen von 300 m (oben), 500 m (Mitte) und 1000 m (unten) und den Referenzstationen DWD-Düsseldorf (links) und DWD-Tönisvorst (rechts).

Im Stadtzentrum sind die positiven Temperaturdifferenzen durchgehend konsistent, was die Präsenz der urbanen Wärmeinsel unterstreicht. Außerhalb des Zentrums hingegen zeigen sich uneinheitliche Temperaturmuster. Einige Gebiete, wie der Hülser Berg und Stadtwald im Norden, der Greiffenhorstpark im Osten und der Forstwald im Süden von Krefeld, weisen niedrigere Temperaturen im Vergleich zum Stadtzentrum auf. Diese kühleren Gebiete stehen im Kontrast zu wärmeren Regionen außerhalb des Zentrums, die vorwiegend in Vororten oder

dicht besiedelten Randbezirken liegen. Dazu zählen unter anderem St. Tönis im Westen, Fischeln im Süden, Uerdingen im Osten und Hüls im Norden.

Ein entscheidender Faktor bei der Rasteranalyse ist die Anzahl der Datenpunkte innerhalb jeder Rasterzelle. Abbildung 3.5 verdeutlicht, dass die Datendichte im Stadtzentrum deutlich höher ist und mit zunehmender Entfernung abnimmt. Dieses Ungleichgewicht kann zu Verzerrungen führen, da Rasterzellen mit wenigen Datenpunkten anfälliger für Ausreißer sind. Diese Verzerrung erklärt möglicherweise einige der ungewöhnlich hohen ΔT -Werte außerhalb des Stadtzentrums, etwa in Bockum (östlich von Krefeld), St. Tönis (westlich von Krefeld) und Taar (nördlich von Krefeld).

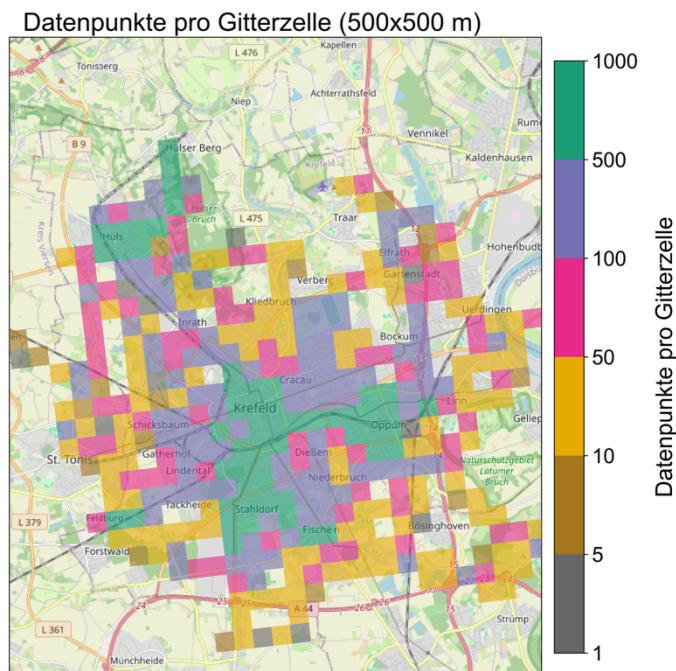


Abbildung 3.5: Anzahl der Datenpunkte pro Rasterzelle bei einer Rastergröße von 500 m.

Zusammenfassend zeigt die Rasteranalyse, dass eine rasterbasierte Darstellung ein effektives Mittel ist, um die räumlichen Muster des städtischen Wärmeinselphänomens darzustellen. Die Wahl der Rastergröße und die Berücksichtigung der Datendichte sind jedoch entscheidend, um Verzerrungen zu minimieren und eine aussagekräftige Visualisierung der Temperaturverteilung zu gewährleisten.

3.3 Tageszeitliche Unterschiede

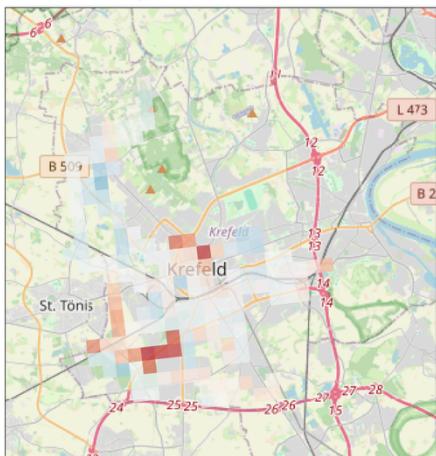
Um ein besseres Verständnis der städtischen Wärmeinsel (Urban Heat Island, UHI) in Krefeld zu gewinnen, wurden die tageszeitlichen Unterschiede der Temperaturmuster untersucht. Zu diesem Zweck wurden die Messungen in vier Zeitintervalle unterteilt:

- **06:00 – 10:00 Uhr (Morgendämmerung bis Vormittag)**
- **10:00 – 16:00 Uhr (Tagesmitte)**
- **16:00 – 22:00 Uhr (Abend)**
- **22:00 – 06:00 Uhr (Nacht)**

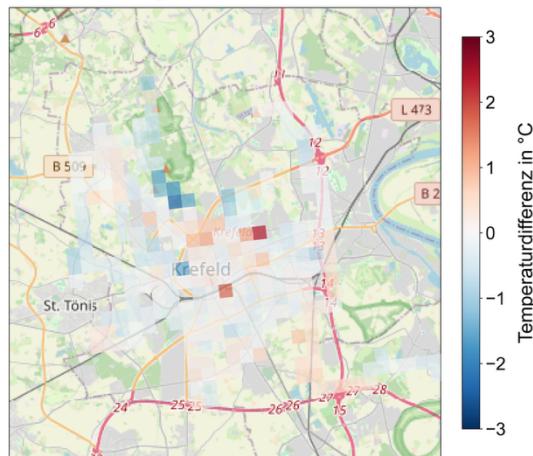
Für jedes Zeitintervall wurden die Datenpunkte in 500 x 500 m große Rasterzellen eingeteilt und innerhalb jeder Zelle gemittelt. Diese räumliche Aggregation ermöglicht eine übersichtliche Darstellung der Temperaturmuster zu verschiedenen Tageszeiten. Die

Ergebnisse wurden auf einer konsistenten Farbskala dargestellt, sodass ein direkter Vergleich der UHI-Intensität im Tagesverlauf möglich ist.

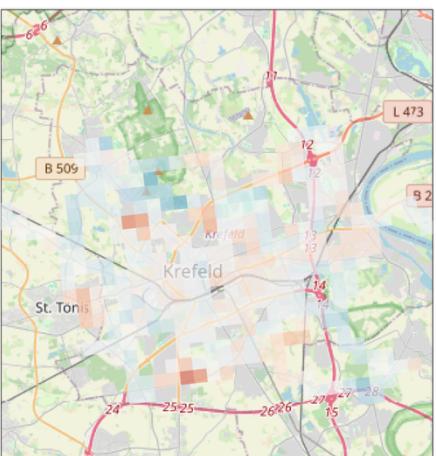
Mittlere Abweichung zu DWD Düsseldorf - 500x500 m Grid
Morgens: 06:00 - 10:00 Uhr



Mittlere Abweichung zu DWD Düsseldorf - 500x500 m Grid
Mittags: 10:00 - 16:00 Uhr



Mittlere Abweichung zu DWD Düsseldorf - 500x500 m Grid
Abends: 16:00 - 22:00 Uhr



Mittlere Abweichung zu DWD Düsseldorf - 500x500 m Grid
Nachts: 22:00 - 06:00 Uhr

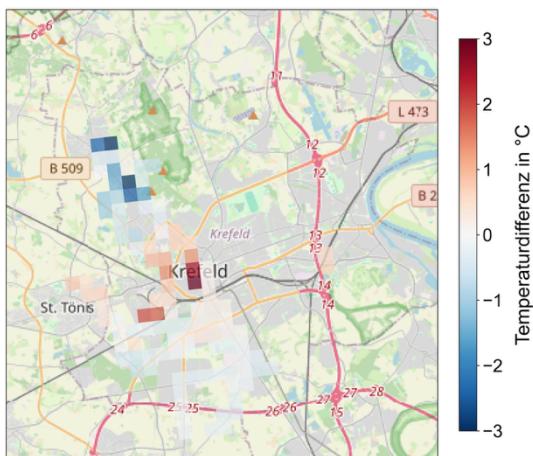
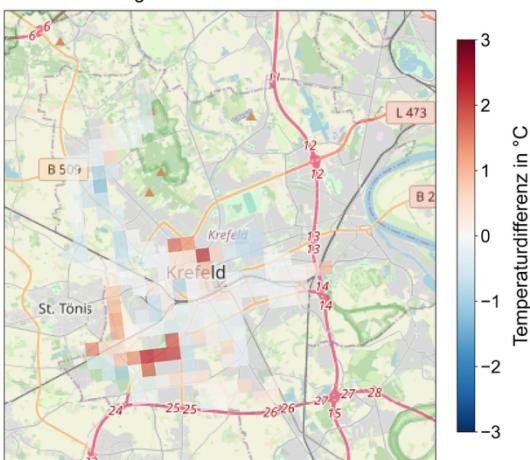
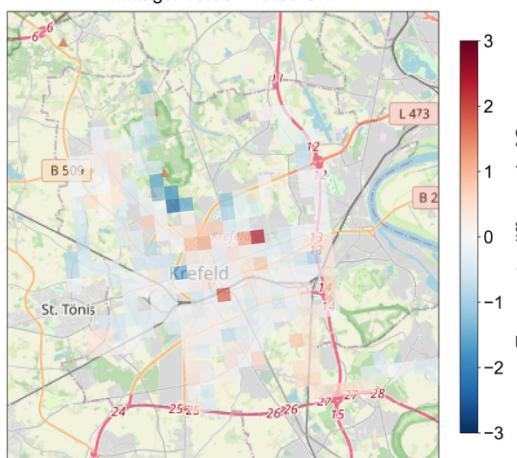


Abbildung 3.6: ΔT mit einer Rastergröße von 500 m zu Morgen- (oben links), Mittags- (oben rechts), Abend- (unten links) und Nachtzeiten (unten rechts), verglichen mit der DWD-Station Düsseldorf.

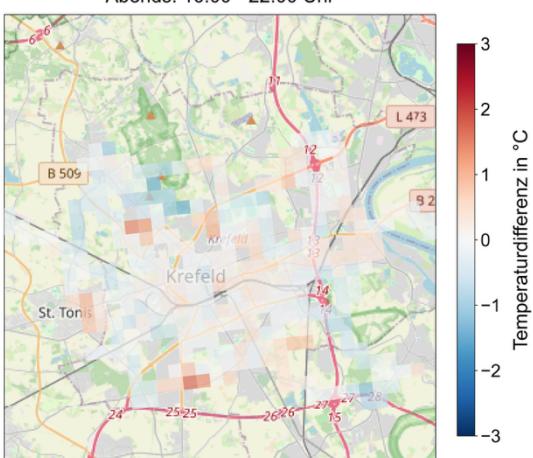
Mittlere Abweichung zu DWD Düsseldorf - 500x500 m Grid
Morgens: 06:00 - 10:00 Uhr



Mittlere Abweichung zu DWD Düsseldorf - 500x500 m Grid
Mittags: 10:00 - 16:00 Uhr



Mittlere Abweichung zu DWD Düsseldorf - 500x500 m Grid
Abends: 16:00 - 22:00 Uhr



Mittlere Abweichung zu DWD Düsseldorf - 500x500 m Grid
Nachts: 22:00 - 06:00 Uhr

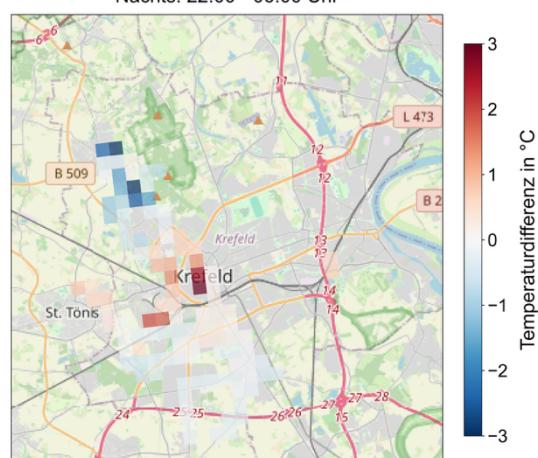


Abbildung 3.6 zeigt, dass die Urban Heat Island zu jeder Tageszeit deutlich erkennbar ist, jedoch in Umfang und Intensität variiert. Aufgrund der geringen Datenlage sind diese Ergebnisse jedoch mit Vorsicht zu interpretieren. Wie bereits in Kapitel 3.2 erwähnt, ist ein

direkter Vergleich einzelner Pixel nicht sinnvoll, stattdessen sollte die Analyse auf den räumlichen Mustern der gesamten Fläche basieren.

- **Morgen (06:00 – 10:00 Uhr):**

In den frühen Morgenstunden ist die UHI am wenigsten ausgeprägt. Die Temperaturdifferenzen sind gering, da die nächtliche Abkühlung in den städtischen und ländlichen Gebieten noch nicht vollständig abgeschlossen ist.

- **Tagesmitte (10:00 – 16:00 Uhr):**

Im Verlauf des Tages nehmen die Temperaturdifferenzen im Stadtzentrum spürbar zu. Der Wärmeinseleffekt wird stärker, da die urbane Bebauung und versiegelte Flächen die Sonnenenergie effizienter speichern und abgeben als die kühlere, bewaldete Umgebung.

- **Abend (16:00 – 22:00 Uhr):**

Während des Abends bleibt die UHI weiterhin deutlich sichtbar. Die gespeicherte Wärme in der Innenstadt sorgt für ein verzögertes Abkühlen im Vergleich zu den umliegenden Grünflächen und Wäldern.

- **Nacht (22:00 – 06:00 Uhr):**

Nachts bleibt der UHI-Effekt bestehen, jedoch mit einem verringerten Datenvolumen, da in diesem Zeitfenster weniger Messfahrten durchgeführt wurden. Dennoch zeigen die Daten, dass die Temperaturdifferenzen in der Innenstadt höher bleiben als in den angrenzenden ländlichen Gebieten.

Zu allen Tageszeiten weisen die großen Grünflächen, wie der Hülser Bruch, der Stadtwald, der Greiffenhorstpark und der Forstwald, die niedrigsten Temperaturdifferenzen auf. Diese kühlen Oasen bieten deutliche Kontraste zum urbanen Zentrum, wo die höchsten Temperaturdifferenzen gemessen werden. Die Muster der Temperaturverteilung stimmen weitgehend mit den Ergebnissen aus Abbildung 3.4 überein, was die Konsistenz der Beobachtungen unterstreicht.

Die tageszeitliche Analyse bestätigt, dass die Intensität der Urban Heat Island im Laufe des Tages variiert, wobei sie während der Tagesmitte und am Abend am stärksten ausgeprägt ist. Die niedrigeren Werte am Morgen und die relativ stabilen Differenzen in der Nacht zeigen, wie dynamisch das Temperaturverhalten in urbanen und perurbanen Gebieten ist. Die Aggregation in Rasterzellen hat sich dabei als hilfreiches Werkzeug erwiesen, um räumliche Muster der UHI zu unterschiedlichen Tageszeiten klar und vergleichbar darzustellen.

Eine weiterführende Analyse könnte sich darauf konzentrieren, wie meteorologische Bedingungen, wie Wind oder Bewölkung, diese tageszeitlichen Muster beeinflussen und welche spezifischen Auswirkungen die Landnutzung auf die Intensität der UHI haben.

4. Vergleich mit stationären Messungen

4.1 Methodik

Um die Messungen der mobilen Messgeräte (Meteotracker) mit den stationären Sensoren des städtischen Klimamessnetzes zu vergleichen, wurde ein zonales Verfahren angewandt. Dabei wurde um jeden stationären Messstandort eine kreisförmige Zone definiert, deren Radius für die Analyse zwischen 50 m, 100 m und 200 m variierte.

Die stationären Messsensoren sind Teil des stadtclimatologischen Messnetzes der Stadt Krefeld, das im Jahr 2023 in Zusammenarbeit mit meteoblue entwickelt und von den Stadtwerken Krefeld (SWK) installiert wurde. Dieses Netzwerk bildet eine zentrale Komponente des Citizen-Science-Projekts zur Erfassung und Analyse des Stadtklimas. Das Messnetz umfasst insgesamt 54 Sensoren, darunter 42 Sensoren der Marke Dragino und 12 Sensoren von Pessl Instruments (siehe Abbildung 4.1). Die strategische Platzierung der Sensoren ermöglicht eine detaillierte Überwachung klimatischer Bedingungen in verschiedenen Teilen der Stadt.

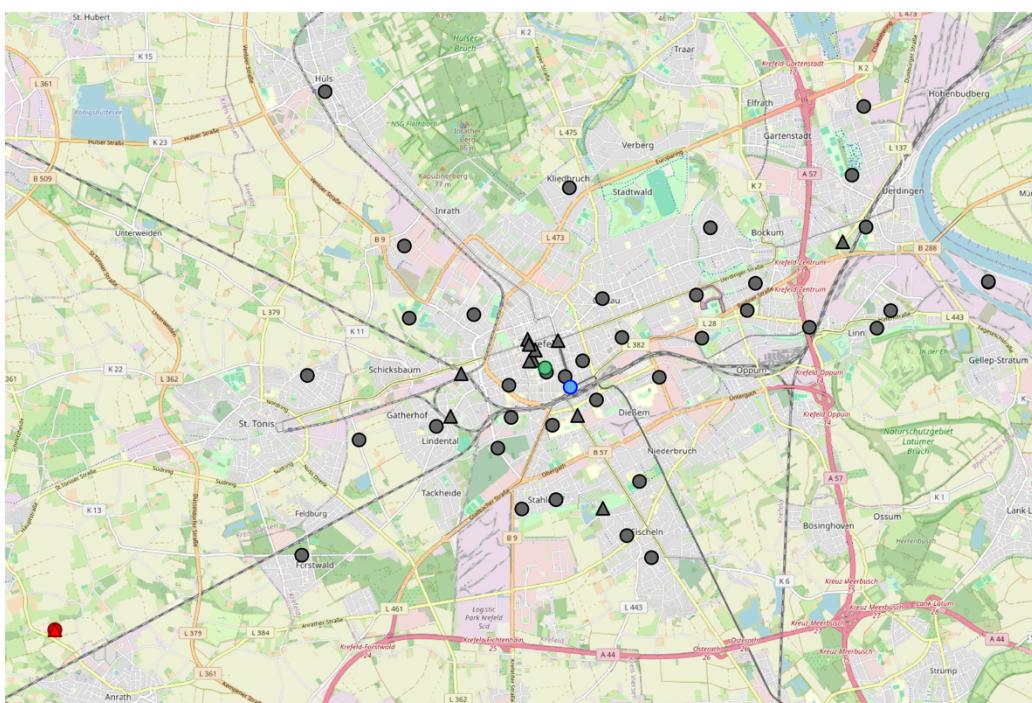


Abbildung 4.1: Übersicht über die Messstandorte (bis Sommer 2025) mit 32 Dragino Sensoren (schwarze Kreise) und 12 Pessl LoRain Sensoren (schwarze Dreiecke) in der Stadt Krefeld. Die blauen und grünen Kreise sind Dragino Sensoren, welche an belebten Plätzen innerhalb der Innenstadt platziert wurden. Der rote Standort stellt die Referenzmessungen eines Dragino und eines Pessl LoRain Sensor dar, welche am DWD-Standort Tönisvorst durchgeführt werden.

Der Vergleich zwischen den mobilen Messgeräten und den stationären Sensoren erfolgte unter der Bedingung, dass sich der mobile Sensor während der Messung innerhalb der definierten Zone um den stationären Sensor befand und die Messungen zeitlich übereinstimmten. Die stationären Sensoren zeichnen ihre Daten in festen Intervallen von 15 Minuten auf, während die mobilen Geräte kontinuierliche Messwerte liefern.

Zur Bewertung der Genauigkeit wurden die absoluten Differenzen zwischen den Messwerten der mobilen und stationären Sensoren berechnet. Um eine statistisch fundierte Aussage über die Abweichungen zu treffen, wurden die Differenzen über den gesamten

Untersuchungszeitraum gemittelt. Das Ergebnis dieser Berechnung ist der Mean Absolute Error (MAE), der für jeden stationären Standort separat ermittelt wurde.

Das Verfahren wurde entwickelt, um die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der mobilen Messgeräte im Vergleich zu den stationären Sensoren zu bewerten. Darüber hinaus liefert die Methodik wertvolle Einblicke in die räumliche und zeitliche Variabilität der Messungen und zeigt potenzielle systematische Abweichungen zwischen den verschiedenen Messsystemen auf.

Die Analyse könnte durch die Einbeziehung zusätzlicher Parameter, wie der Einfluss von Windrichtung und -geschwindigkeit oder der Landnutzung innerhalb der definierten Zonen, noch weiter verfeinert werden. Ein Vergleich bei unterschiedlichen Wetterbedingungen und zu verschiedenen Tageszeiten könnte ebenfalls interessante Erkenntnisse über die Performance der mobilen Sensoren liefern.

Diese Methodik legt eine solide Grundlage für die Integration mobiler Messgeräte in städtische Klimamessnetze und zeigt deren Potenzial für die Ergänzung bestehender Messsysteme.

4.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Analyse, visualisiert in den farbcodierten MAEs (Mean Absolute Errors) pro Station in Abbildung 4.2, Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4 sowie tabellarisch dargestellt in Tabelle 4.1 bis

Tabelle 4.3, verdeutlichen die Auswirkungen der Bufferzonengröße auf die Genauigkeit der Vergleiche zwischen mobilen und stationären Messungen.

Die Berechnungen zeigen, dass die durchschnittlichen MAEs variieren, je nachdem, welche Bufferzonengröße gewählt wurde:

- **50 m-Zone:** MAE im Durchschnitt bei **1.03 K**
- **100 m-Zone:** MAE im Durchschnitt bei **1.15 K**
- **200 m-Zone:** MAE im Durchschnitt bei **1.20 K**

Im Vergleich zum Projekt im Jahr 2024 fallen die Messabweichungen deutlich geringer aus. Dies lässt sich dadurch begründen, dass das Messnetz im Herbst 2025 durch 20 zusätzliche Sensoren im Stadtgebiet erweitert wurde. Durch einen zusätzlichen Strahlenschutz um die Sensoren verbessert sich die Qualität der stationären Messungen deutlich, vor allem in den Sommermonaten während Zeiten mit hoher Sonneneinstrahlung.

Die 200 m-Bufferzone bietet die höchste Datenverfügbarkeit, wie in

Tabelle 4.3 ersichtlich, aber auch die größte Streuung der MAEs, da einige Werte durch größere räumliche Unterschiede zwischen den mobilen und stationären Messbedingungen beeinflusst werden.

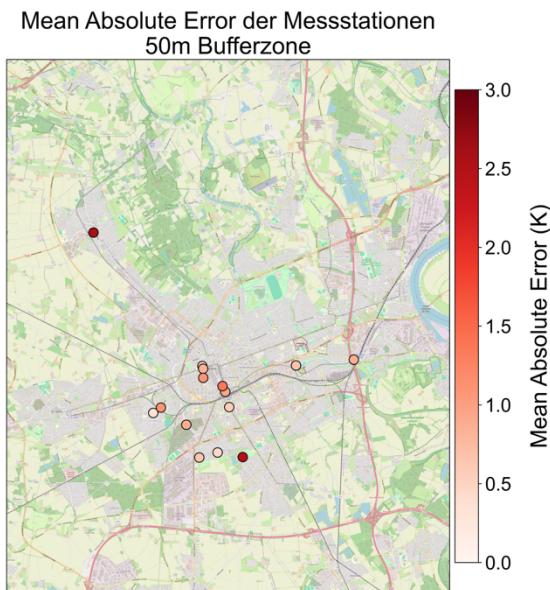


Abbildung 4.2: Stationäre Messstandorte mit farbcodiertem MAE, Bufferzone von 50 m.

Interpretation der Ergebnisse

- **200 m-Bufferzone:**

Diese Zone umfasst die meisten Datenpunkte, da sie die größte räumliche Abdeckung bietet. Durch die größere Ausdehnung werden jedoch auch Messwerte aus Gebieten mit unterschiedlichen mikroklimatischen Bedingungen einbezogen. Dies kann zu leicht erhöhten Abweichungen führen, was sich im durchschnittlichen MAE von 1.20 K widerspiegelt. In dieser Zone treten zudem einige Stationen mit deutlich höheren Abweichungen auf, da lokale Unterschiede in Landnutzung, Bebauung oder Vegetationsdichte einen stärkeren Einfluss auf die Messergebnisse haben.

- **100 m-Bufferzone:**

In der 100 m-Zone liegt der durchschnittliche MAE bei 1.15 K. Hier ist die räumliche Nähe zwischen mobilen und stationären Sensoren stärker gegeben, wodurch sich lokale Unterschiede weniger stark auswirken. Dies führt zu einer insgesamt geringeren Streuung der Werte, und extreme Abweichungen treten seltener auf. Dennoch bleiben gewisse Unterschiede zwischen den einzelnen Stationen messbar, die auf kleinräumige Variationen im Mikroklima oder auf kurzzeitige Messunsicherheiten zurückzuführen sein könne.

- **50 m-Bufferzone:**

Die kleinste Zone zeigt mit einem durchschnittlichen MAE von 1.03 K die präzisesten Ergebnisse. Da die mobile Station hier besonders nah an der stationären Messstation positioniert ist, werden räumliche Unterschiede zwischen den Messpunkten weitgehend reduziert. Dadurch lassen sich die Temperaturmessungen gut miteinander

vergleichen. Aufgrund der geringeren Anzahl an Datenpunkten kann der Einfluss einzelner Ausreißer jedoch stärker ins Gewicht fallen.

Mean Absolute Error der Messstationen
100m Bufferzone

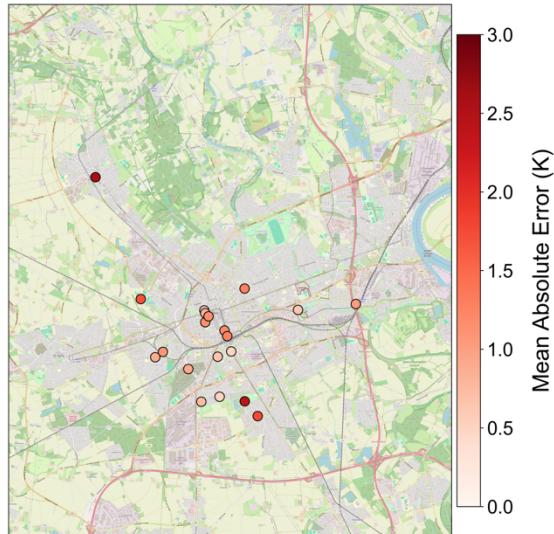


Abbildung 4.3: Stationäre Messstandorte mit farbcodiertem MAE, Bufferzone von 100 m.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die mittleren Abweichungen zwischen den mobilen und stationären Messungen über die verschiedenen Bufferzonen hinweg nur geringfügig unterscheiden. Kleinere Bufferzonen führen erwartungsgemäß zu präziseren Vergleichen, da die räumlichen Unterschiede zwischen den Messpunkten reduziert werden. Größere Bufferzonen erhöhen zwar die Datenverfügbarkeit und ermöglichen umfassendere Analysen, beinhalten jedoch auch Messwerte aus Bereichen mit unterschiedlichen mikroklimatischen Bedingungen, was zu leicht erhöhten MAE-Werten führen kann.

Auffällig sind insbesondere die Stationen *0004A30B00F3031E* und *A840415A1187127C*, die unabhängig von der Buffergröße höhere Abweichungen aufweisen. Eine nähere Untersuchung der lokalen Umgebung dieser Stationen könnte helfen, die Ursachen dieser systematischen Unterschiede zu verstehen.

Mean Absolute Error der Messstationen
200m Bufferzone

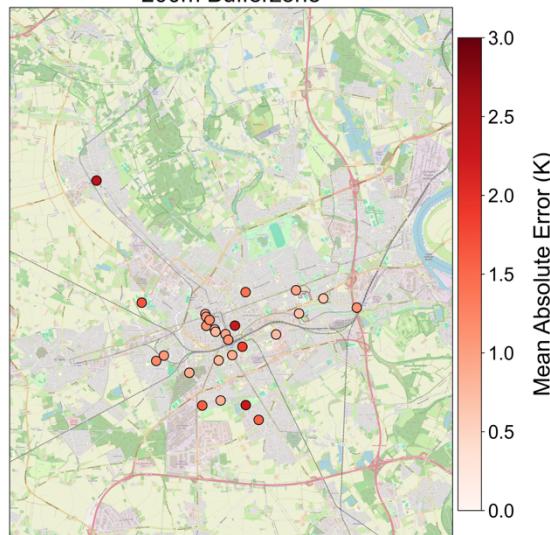


Abbildung 4.4: Stationäre Messstandorte mit farbcodiertem MAE, Bufferzone von 200 m.

Für zukünftige Analysen könnte eine adaptive Bufferzonengröße sinnvoll sein, die sich stärker an den lokalen Gegebenheiten und Analysezielen orientiert. Zudem wäre eine Erweiterung der Bewertung um weitere Einflussfaktoren wie Landnutzung, Vegetationsbedeckung oder Versiegelungsgrad empfehlenswert, um räumliche Unterschiede in den Messwerten gezielter einordnen zu können.

Insgesamt verdeutlicht die Analyse die Zuverlässigkeit und Konsistenz der mobilen Klimadaten im Vergleich zu stationären Messungen und bietet eine fundierte Grundlage für die Weiterentwicklung von Methoden zur Verknüpfung beider Datentypen.

Tabelle 4.1: MAE-Werte der stationären Messsensoren mit einer Bufferzone von 50 m.

ID	Lat	Lon	MAE in K
A84041551187126F	51.3206	6.5362	0.36
A84041DB31849A5B	51.3095	6.5653	0.45
A840411821871206	51.3081	6.5570	0.65
A84041FAC1849A7B	51.3340	6.6007	0.68
A840419781849A88	51.3356	6.6268	0.88
A84041C1A1849A4E	51.3173	6.5512	0.89
A840415CC1849A72	51.3266	6.5687	0.93
A840419991849A5C	51.3282	6.5675	1.36
A840415A1187127C	51.3714	6.5092	2.57
0004A30B00F2C6B1	51.3223	6.5705	0.58
0004A30B00F2C503	51.3338	6.5584	0.62
0004A30B00F31DD9	51.3331	6.5587	0.83
0004A30B00F29531	51.3305	6.5588	1.09
0004A30B00F2E5DE	51.3221	6.5397	1.11
0004A30B00F3031E	51.3082	6.5766	2.46

Tabelle 4.2: MAE-Werte der stationären Messsensoren mit einer Bufferzone von 100 m.

ID	Lat	Lon	MAE in K
A84041DB31849A5B	51.3095	6.5653	0.50
A840417E6187127D	51.3208	6.5644	0.66
A84041FAC1849A7B	51.3340	6.6007	0.67
A840411821871206	51.3081	6.5570	0.75
A84041551187126F	51.3206	6.5362	0.89
A84041C1A1849A4E	51.3173	6.5512	0.91

A840419781849A88	51.3356	6.6268	1.03
A840419991849A5C	51.3282	6.5675	1.19
A840415CC1849A72	51.3266	6.5687	1.28
A840418371849A6E	51.3400	6.5766	1.31
A84041C891871240	51.3370	6.5297	1.70
A8404113A1871211	51.3040	6.5825	1.77
A840415A1187127C	51.3714	6.5092	2.59
0004A30B00F2C6B1	51.3223	6.5705	0.50
0004A30B00F2C503	51.3338	6.5584	0.65
0004A30B00F31DD9	51.3331	6.5587	0.87
0004A30B00F2E5DE	51.3221	6.5397	1.09
0004A30B00F29531	51.3305	6.5588	1.15
0004A30B00F2AED1	51.3322	6.5603	1.18
0004A30B00F3031E	51.3082	6.5766	2.39

Tabelle 4.3: MAE-Werte der stationären Messsensoren mit einer Bufferzone von 200 m.

ID	Lat	Lon	MAE in K
A84041F2A187121F	51.3382	6.6117	0.64
A84041FAC1849A7B	51.3340	6.6007	0.71
A840413871849A73	51.3295	6.5627	0.72
A840414961849A50	51.3281	6.5903	0.75
A840417CC1849A7D	51.3288	6.5630	0.79
A840417E6187127D	51.3208	6.5644	0.79
A84041DB31849A5B	51.3095	6.5653	0.87
A84041C1A1849A4E	51.3173	6.5512	0.90
A840419991849A5C	51.3282	6.5675	0.93
A84041DC21849A74	51.3405	6.5993	0.93
A840415CC1849A72	51.3266	6.5687	1.09
A840419781849A88	51.3356	6.6268	1.12
A84041551187126F	51.3206	6.5362	1.21
A840418371849A6E	51.3400	6.5766	1.42
A8404113A1871211	51.3040	6.5825	1.56
A840411821871206	51.3081	6.5570	1.58
A84041C891871240	51.3370	6.5297	1.68

A840419CD1871253	51.3246	6.5751	1.83
A840415B61849A5D	51.3306	6.5717	2.25
A840415A1187127C	51.3714	6.5092	2.39
0004A30B00F2C503	51.3338	6.5584	0.87
0004A30B00F2C6B1	51.3223	6.5705	0.87
0004A30B00F2E5DE	51.3221	6.5397	1.05
0004A30B00F31DD9	51.3331	6.5587	1.06
0004A30B00F29531	51.3305	6.5588	1.11
0004A30B00F2AED1	51.3322	6.5603	1.17
0004A30B00F3031E	51.3082	6.5766	2.26

5. Ausblick

Das Citizen-Science-Projekt in Krefeld hat auf eindrucksvolle Weise gezeigt, wie Bürger aktiv zur Sammlung und Analyse von Klimadaten beitragen können. Die Zusammenarbeit zwischen der Stadt Krefeld, meteoblue und den engagierten Bürgern hat nicht nur zu einer beispiellosen Menge an Daten geführt, sondern auch wertvolle Einblicke in lokale Klimaphänomene wie die urbane Wärmeinsel (Urban Heat Island, UHI) ermöglicht. Die innovativen Methoden, wie die Kombination mobiler und stationärer Messungen sowie die Anwendung von Raster- und tageszeitlichen Analysen, haben die Grundlage für eine tiefgehende Untersuchung des Stadtclimas geschaffen.

Die Ergebnisse verdeutlichen sowohl die Potenziale als auch die Grenzen der mobilen Messungen. Die präzisen Daten aus kleineren Bufferzonen erlaubten detaillierte Vergleiche, während größere Zonen eine breitere Datengrundlage lieferten, jedoch anfälliger für Abweichungen durch mikroklimatische Unterschiede waren. Darüber hinaus zeigte die räumliche und tageszeitliche Analyse, wie dynamisch die Temperaturmuster innerhalb Krefelds sind und wie stark Faktoren wie Bebauung, Grünflächen oder Verkehrsaufkommen diese beeinflussen.

Herausforderungen wie die begrenzte Verfügbarkeit von Daten in bestimmten Zeitintervallen oder die systematischen Abweichungen bei hohen Temperaturen unterstreichen den Bedarf an weiteren Optimierungen. Eine Verfeinerung der Methodik, etwa durch die Einbeziehung zusätzlicher Umweltparameter wie Windrichtung oder Feuchtigkeit, könnte die Aussagekraft zukünftiger Analysen weiter erhöhen.

Dieses Projekt bietet nicht nur wichtige wissenschaftliche Erkenntnisse, sondern auch eine solide Grundlage für praktische Anwendungen. Stadtplaner und Entscheidungsträger können die gewonnenen Daten nutzen, um gezielte Maßnahmen zur Klimaanpassung zu entwickeln, beispielsweise die Schaffung zusätzlicher Grünflächen oder die Optimierung der Stadtarchitektur zur Minderung der Wärmeinseleffekte.

Ein weiterer zentraler Aspekt ist die Förderung des Klimabewusstseins der Bürger. Die aktive Einbindung der Bevölkerung hat nicht nur zur Datenerhebung beigetragen, sondern auch das Interesse und Verständnis für lokale Klimafragen gestärkt. Dies schafft die Grundlage für eine engagierte Gemeinschaft, die aktiv an der Gestaltung einer nachhaltigen Stadtentwicklung mitwirken kann.

Aufbauend auf den bisherigen Ergebnissen könnten zukünftige Projekte die Methodik weiterentwickeln und skalieren. Denkbar wäre eine Ausweitung des Citizen-Science-Ansatzes auf andere Städte oder Regionen, um Vergleichsdaten zu generieren und globale Muster besser zu verstehen. Die Integration von Echtzeit-Datenströmen oder die Nutzung fortschrittlicher Datenanalytik, etwa durch künstliche Intelligenz, könnte die Effizienz und Genauigkeit weiter verbessern.

Letztlich zeigt dieses Projekt, dass der Weg zu einer nachhaltigeren Stadtentwicklung durch die aktive Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Politik und Bürgern geebnet wird. Die Erkenntnisse aus Krefeld können als Blaupause für ähnliche Initiativen dienen und so einen bedeutenden Beitrag zur Bewältigung der Herausforderungen des Klimawandels leisten.